



GRADUATE
SCHOOL OF
FACULTY OF **SCIENCE**
KYOTO UNIVERSITY

重力波

田中 貴浩
(京大院理)

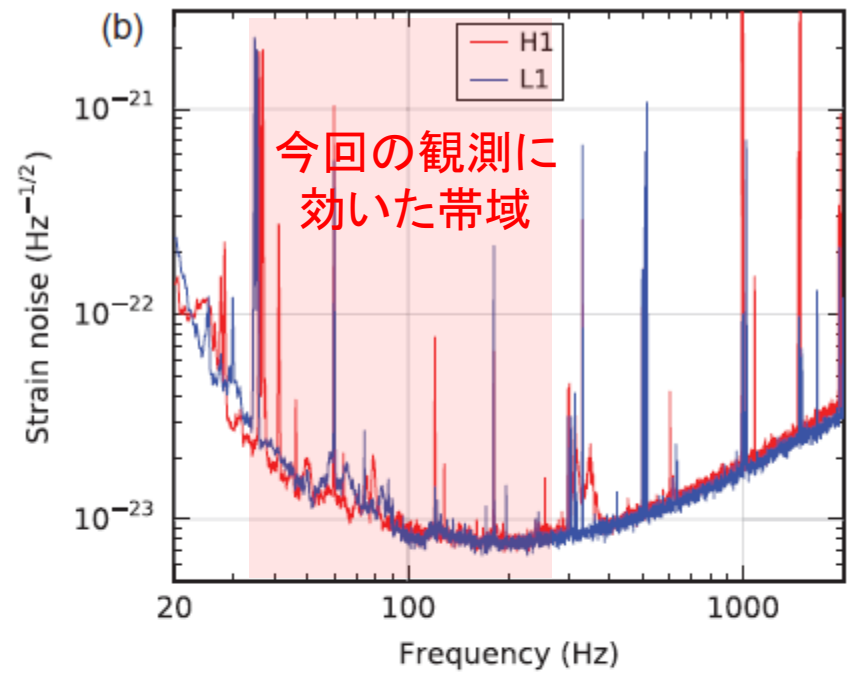
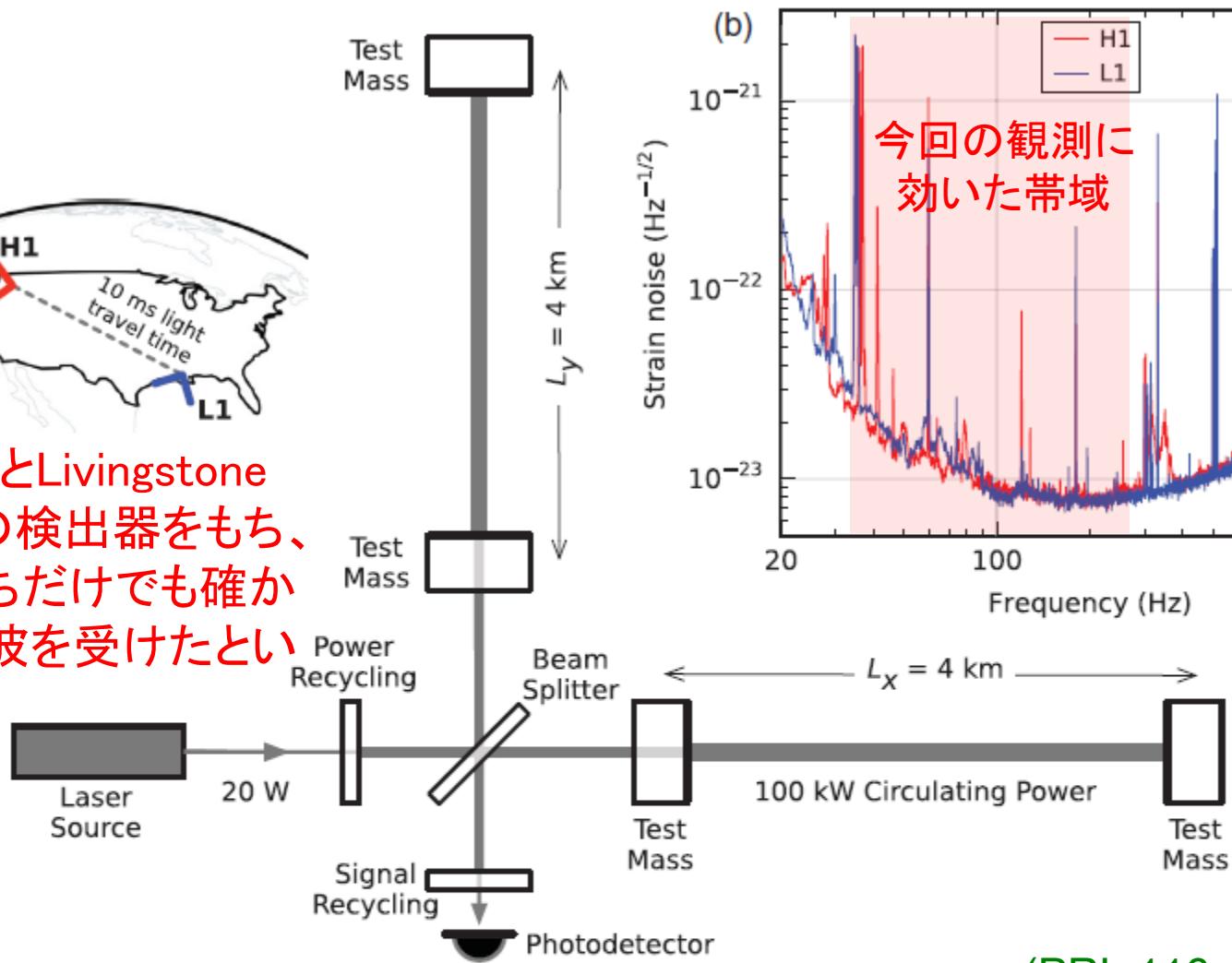
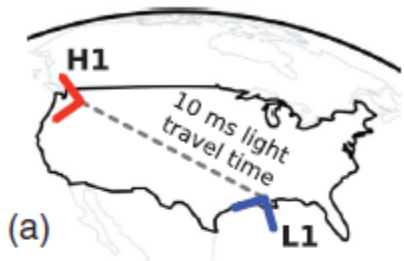
重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開

New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources

LIGOによる重力波初検出

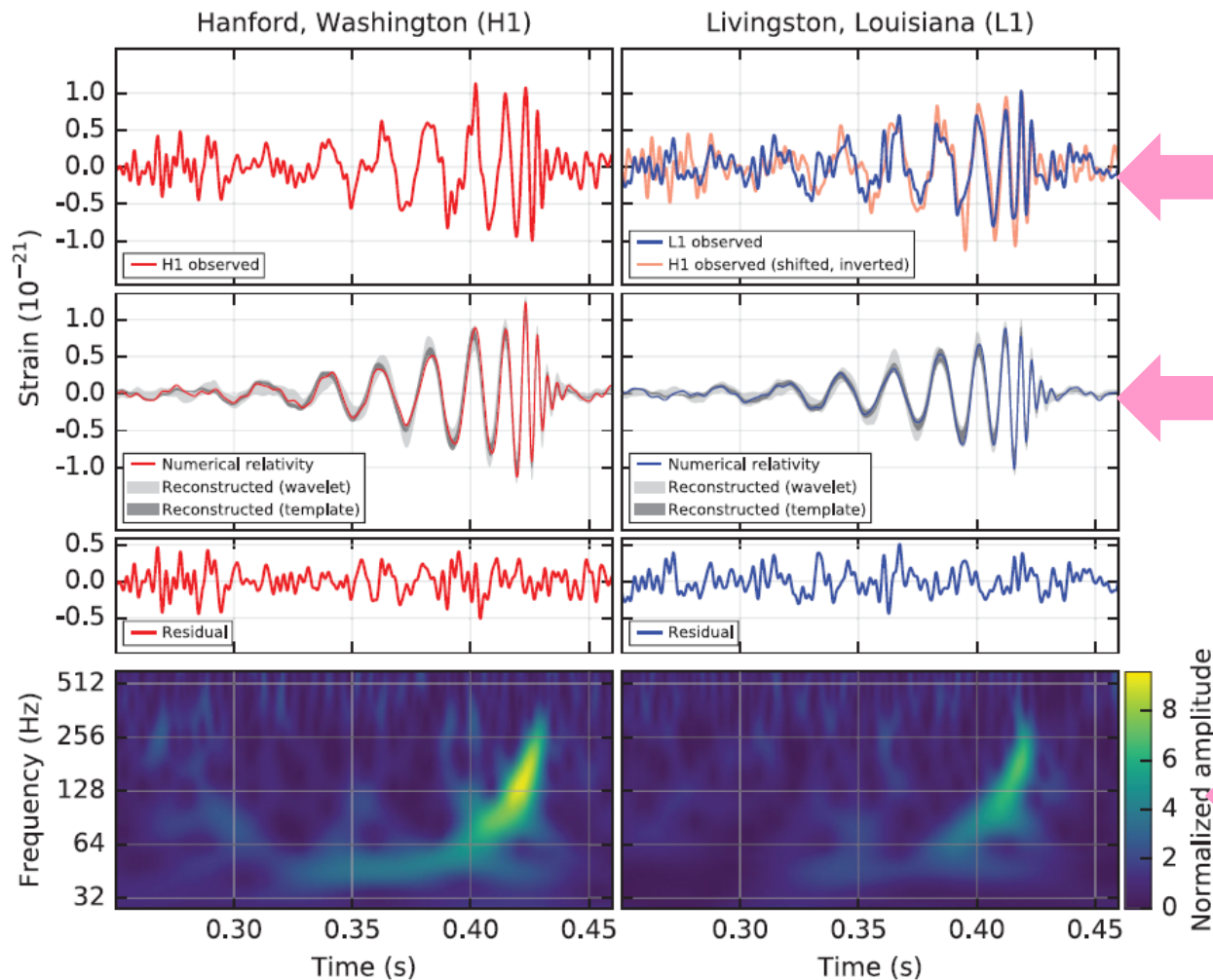
- 2016年2月11日
日本時間では2月12日0:30から記者会見
- 39日間の観測データを解析、2台の検出器が同時に観測しているデータは16日分
- 2015年9月14日09:50:45 UTCに振幅 10^{-21} の連星ブラックホールからの重力波をS/N~24で検出
- 合体前の質量は $36_{-4}^{+5} M_{\text{太陽}} + 29_{-4}^{+4} M_{\text{太陽}}$
- 合体後の質量は $62_{-4}^{+4} M_{\text{太陽}}$
- 推定される距離は $410_{-180}^{+160} \text{Mpc}$ $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$
- GW150914と命名された

HanfordとLivingstone
に2台の検出器をもち、
自分たちだけでも確かに
重力波を受けたという
戦略。



(PRL 116, 061102(2016))

FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the wave; these length changes are reversed during the other half-cycle. The output photodetector records these differential cavity length variations. While a detector's directional response is maximal for this case, it is still significant for most other angles of incidence or polarizations (gravitational waves propagate freely through the Earth). *Inset (a)*: Location and orientation of the LIGO detectors at Hanford, WA (H1) and Livingston, LA (L1). *Inset (b)*: The instrument noise for each detector near the time of the signal detection; this is an amplitude spectral density, expressed in terms of equivalent gravitational-wave strain amplitude. The sensitivity is limited by photon shot noise at frequencies above 150 Hz, and by a superposition of other noise sources at lower frequencies [47]. Narrow band features include calibration lines (22, 28, 330, and 1080 Hz), vibrational modes of suspension



35Hz-350Hzの帯域のみに制限し、強いノイズを含む周波数だけを取り除いた結果

数値相対論にもとづく best-fitモデル

時間周波数空間でのパワーでもシグナルが見えている

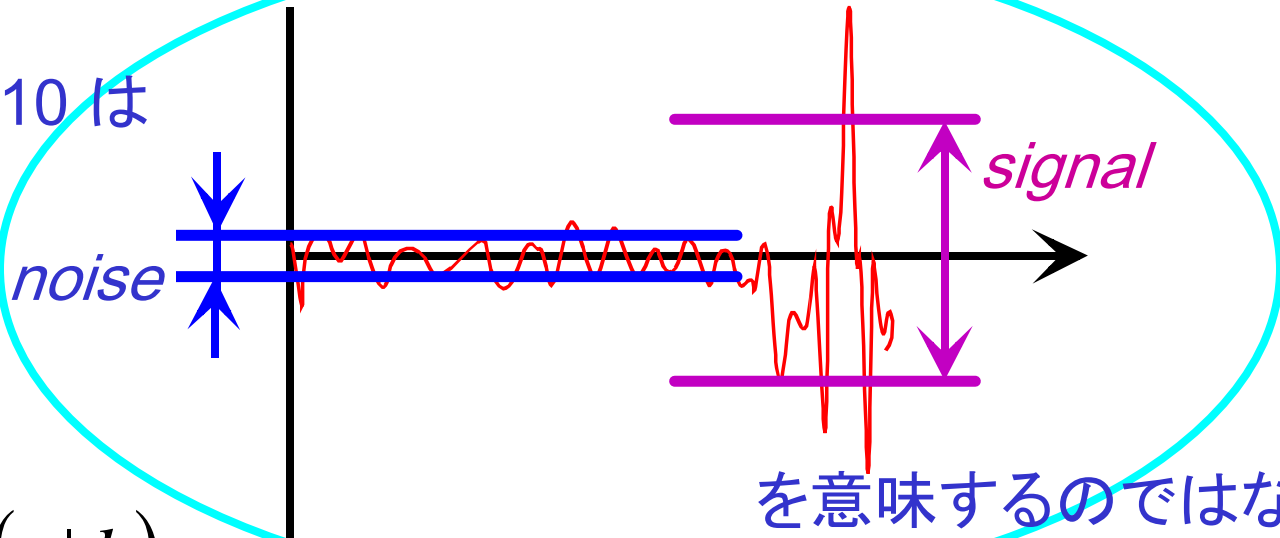
FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors’ most sensitive frequency band, and band-reject filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. *Top row, left:* H1 strain. *Top row, right:* L1 strain. GW150914 arrived first at L1 and $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors’ relative orientations). *Second row:* Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using binary black hole template waveforms [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain signal as a linear combination of sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. *Third row:* Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. *Bottom row:* A time-frequency representation [42] of the strain data, showing the signal frequency increasing over time.

(PRL 116, 061102(2016))

正確な理論波形の予言が必要だったのか？

これまで、しばしば、データ解析では noisy data と templates の間の最大相関を探するために理論的な波形の予測が不可欠と説明してきた。

S/N ~ 10 は



$$\frac{(s|h)}{\sqrt{\langle (n|h)^2 \rangle}} \approx 10$$

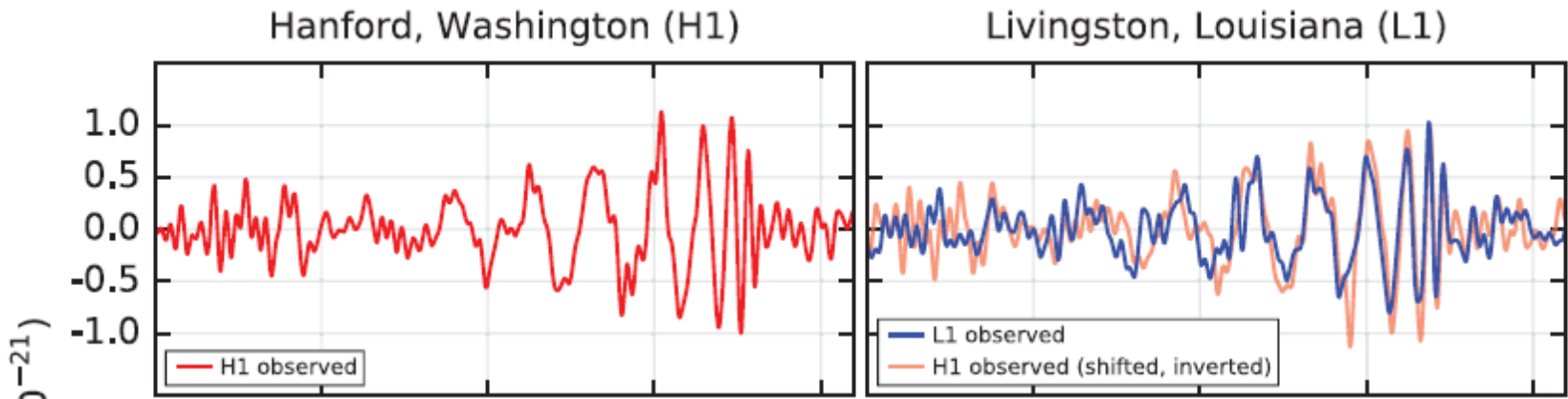
noise

template

$$(s|h) \approx \int \frac{df}{S_n(f)} s(f) h^*(f)$$

Noiseの2点相関のフーリエ成分

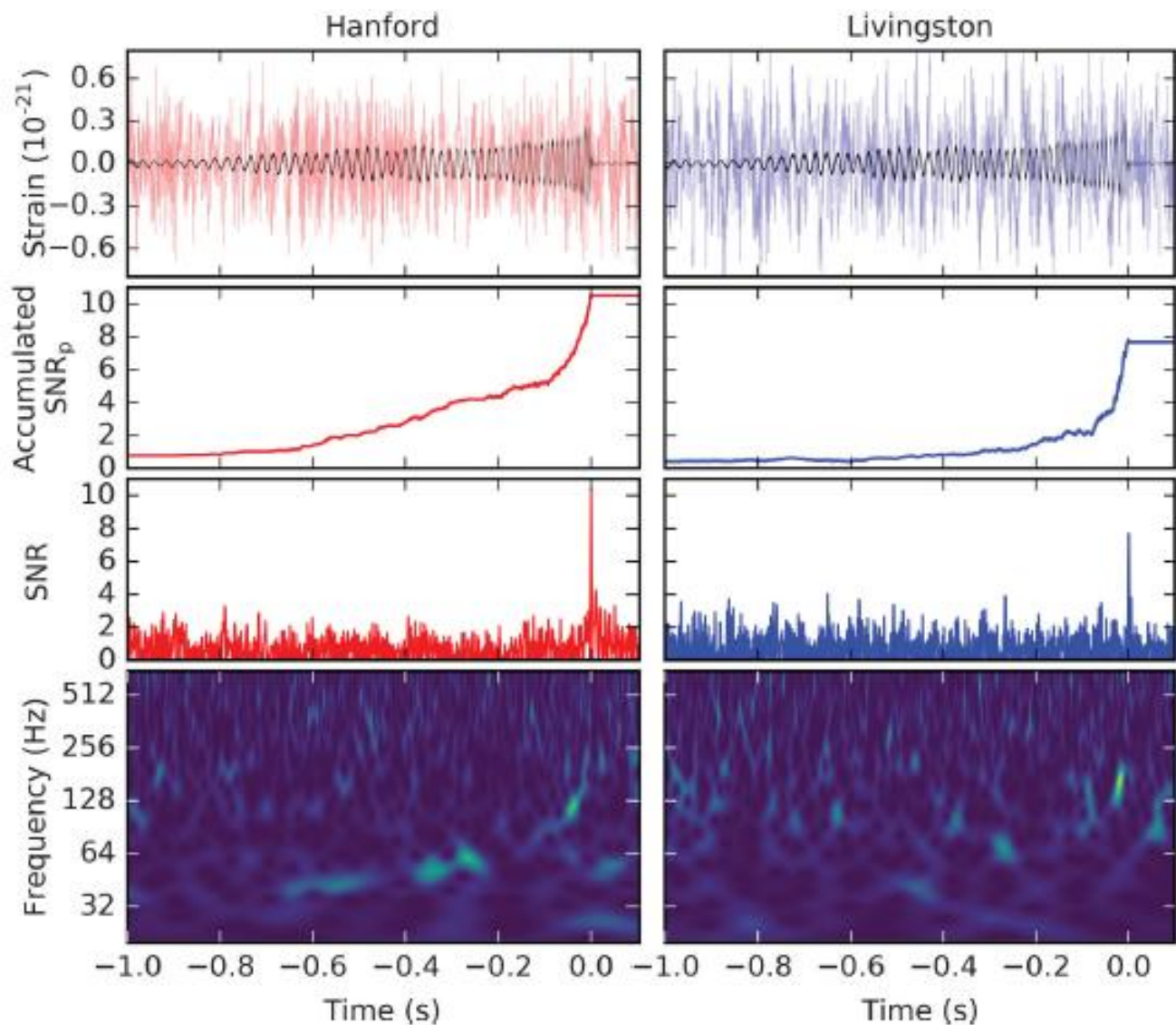
しかし、今回のGW150914では相関解析なしにシグナルが見えている



(PRL 116, 061102(2016))

- 初検出のS/Nはthresholdぎりぎりの10程度である可能性が高いと予想されていた。
- それにもまして、合体までに2000回転ほどする中性子星連星合体と10回転ほどしかないBH連星合体では話が大きく異なる。

そうこうするうちに、二つ目のイベントが発表された



GW151226

PRL 116, 241103 (2016)

(arXiv:1606.04855)

今度はmatched filtering が必要

| Event | GW150914 | GW151226 | LVT151012 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Signal-to-noise ratio ρ | 23.7 | 13.0 | 9.7 |
| False alarm rate FAR/yr ⁻¹ | $< 6.0 \times 10^{-7}$ | $< 6.0 \times 10^{-7}$ | 0.37 |
| p-value | 7.5×10^{-8} | 7.5×10^{-8} | 0.045 |
| Significance | $> 5.3\sigma$ | $> 5.3\sigma$ | 1.7σ |
| Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$ | $36.2^{+5.2}_{-3.8}$ | $14.2^{+8.3}_{-3.7}$ | 23^{+18}_{-6} |
| Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$ | $29.1^{+3.7}_{-4.4}$ | $7.5^{+2.3}_{-2.3}$ | 13^{+4}_{-5} |
| Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$ | $28.1^{+1.8}_{-1.5}$ | $8.9^{+0.3}_{-0.3}$ | $15.1^{+1.4}_{-1.1}$ |
| Total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$ | $65.3^{+4.1}_{-3.4}$ | $21.8^{+5.9}_{-1.7}$ | 37^{+13}_{-4} |
| Effective inspiral spin χ_{eff} | $-0.06^{+0.14}_{-0.14}$ | $0.21^{+0.20}_{-0.10}$ | $0.0^{+0.3}_{-0.2}$ |
| Final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$ | $62.3^{+3.7}_{-3.1}$ | $20.8^{+6.1}_{-1.7}$ | 35^{+14}_{-4} |
| Final spin a_f | $0.68^{+0.05}_{-0.06}$ | $0.74^{+0.06}_{-0.06}$ | $0.66^{+0.09}_{-0.10}$ |
| Radiated energy $E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$ | $3.0^{+0.5}_{-0.4}$ | $1.0^{+0.1}_{-0.2}$ | $1.5^{+0.3}_{-0.4}$ |
| Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$ | $3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$ | $3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$ | $3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$ |
| Luminosity distance D_L/Mpc | 420^{+150}_{-180} | 440^{+180}_{-190} | 1000^{+500}_{-500} |
| Source redshift z | $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ | $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ | $0.20^{+0.09}_{-0.09}$ |
| Sky localization $\Delta\Omega/\text{deg}^2$ | 230 | 850 | 1600 |

GW150914は非常に
S/Nが高い

質量分布に広がりが見
えてきた

GW151226は、合体前
に自転があったことが
示唆される

(arXiv:1606.04856)

今回の重力波検出から何が言えるのか

- 重力波の直接検出

- 本当に受かった

- 重力波振幅が 10^{-21} とは4kmの腕の長さに対して 10^{-3} fm以下の変位

- 本当に伝播してきた

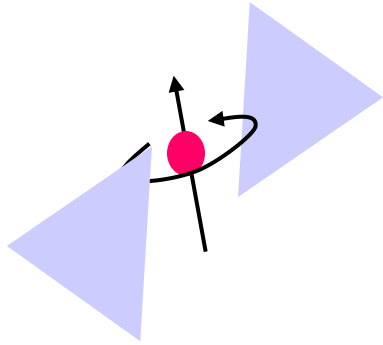
- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホールの存在

- $\sim 10M_{\text{太陽}}$ のブラックホール候補天体X線連星として約20例見つかった

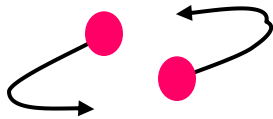
- BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

間接的な重力波の存在証明は存在

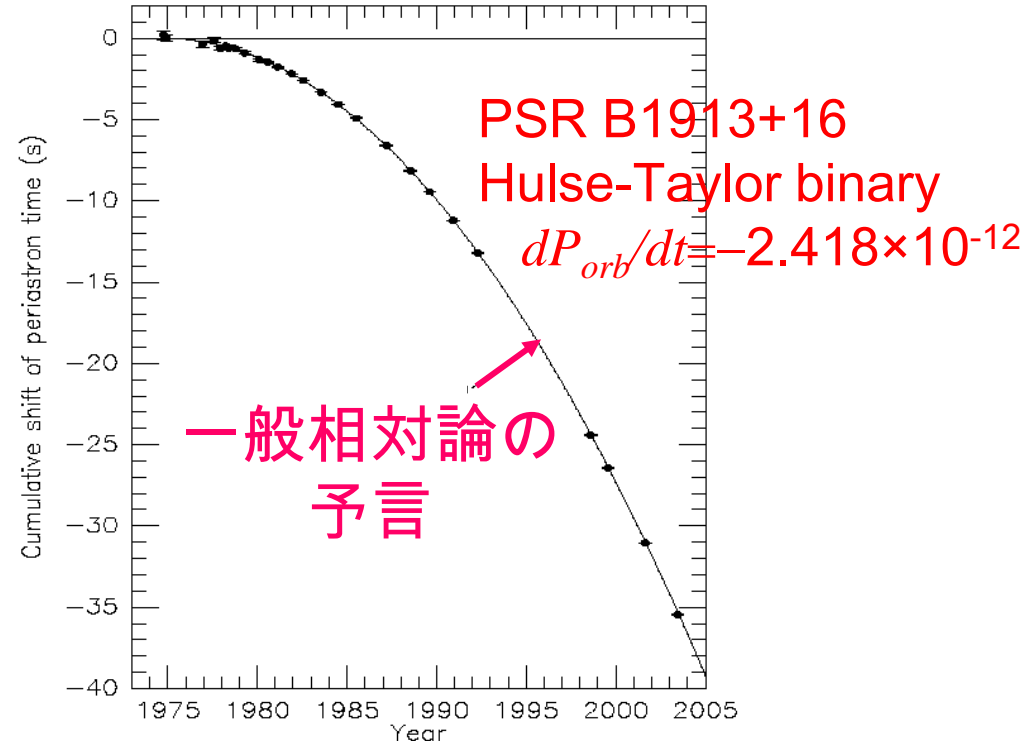
Pulsar は理想的な時計



連星をなす pulsar による
一般相対論の検証



重力波放出による近点通過時刻の変化



(J.M. Weisberg and J.H. Taylor, astro-ph/0407149.)

HulseとTaylorは1993年にNobel賞を受賞

- 重力波の放出は確かめられていたが、伝播は未確認だった

今回の重力波検出から何が言えるのか

- 重力波の直接検出

- 本当に受かった
- 本当に伝播してきた

- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホール連星の存在

- $\sim 10M_{\text{太陽}}$ のブラックホール候補天体はX線連星として約20例見つかっているが、これほど重たいBHの存在は明らかではなかった。しかも、かなりたくさん存在しているらしい。

- $0.6-12\text{events/year/Gpc}^3$

- BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

ABSTRACT

The discovery of the gravitational-wave source GW150914 with the Advanced LIGO detectors provides the first observational evidence for the existence of binary black-hole systems that inspiral and merge within the age of the Universe. Such black-hole mergers have been predicted in two main types of formation models, involving isolated binaries in galactic fields or dynamical interactions in young and old dense stellar environments. The measured masses robustly demonstrate that relatively “heavy” black holes ($\gtrsim 25 M_{\odot}$) can form in nature. This discovery implies relatively weak massive-star winds and thus the formation of GW150914 in an environment with metallicity lower than $\simeq 1/2$ of the solar value. The rate of binary black-hole mergers inferred from the observation of GW150914 is consistent with the higher end of rate predictions ($\gtrsim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$) from both

大質量のBH連星の形成シナリオ

- 重元素量が少ない

⇒ 透明度が高い

⇒ 星形成段階での弱いフィードバック

⇒ 星風による質量放出が弱い

低い重元素量は
不可欠な要素

- 星の高速回転

⇒ 対流領域の増加による一様化

⇒ 星がよりコンパクトになり、星風による質量放出が弱い

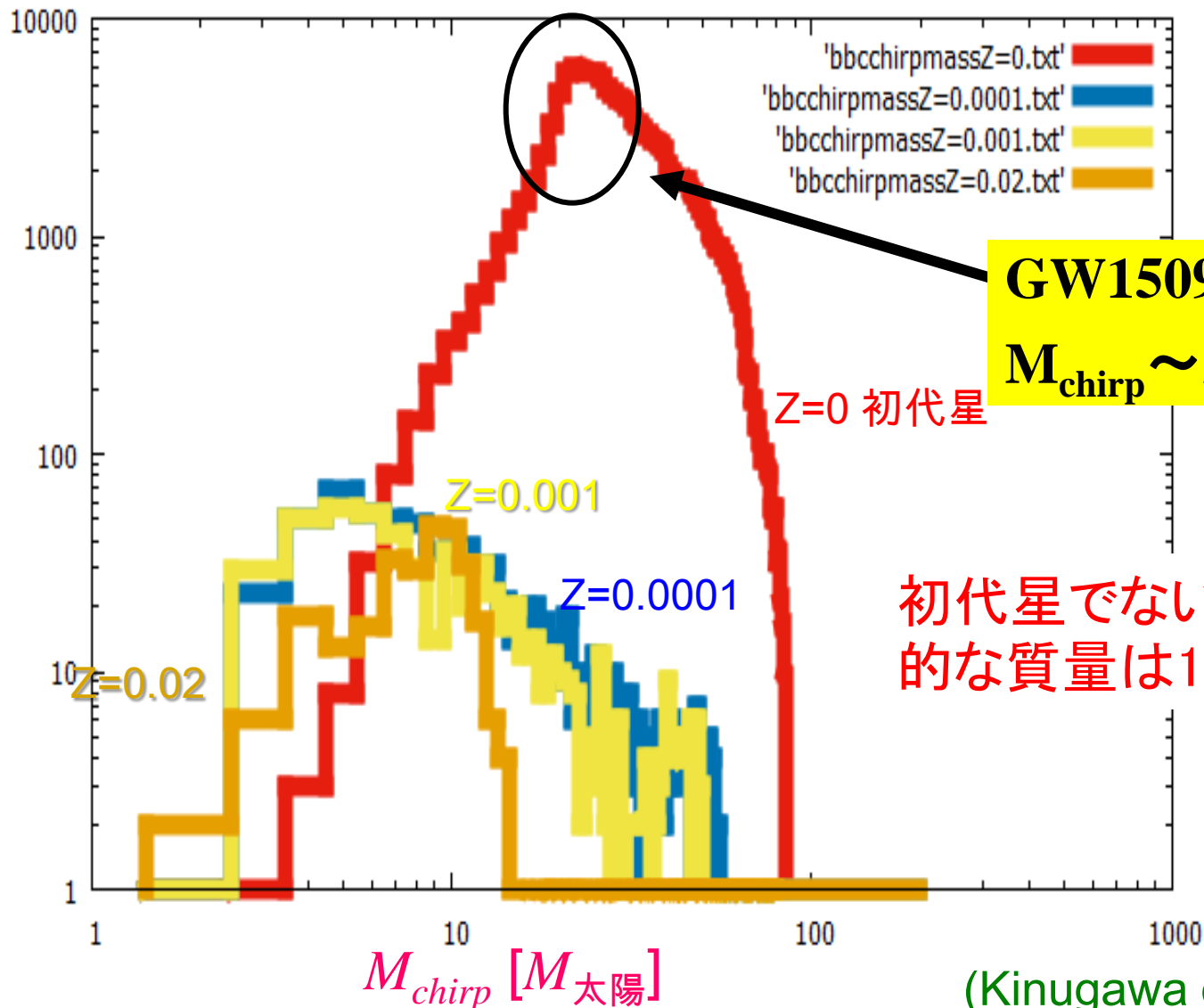
The Astrophysical Journal Letters, 818:L22 (2016)

rations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local Universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby Universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties of low (as opposed to zero) metallicity populations, which show broader distributions (Belczynski et al. 2015).

この論文で、 $30M_{\text{太陽}}$ のBH連星が最初に見つかったことと衣川君たちの論文で考えた初代星起源の連星形成シナリオが非常にぴったりと符合しているとmentionされていた。

(衣川君のスライドを一部改変)

10⁶個の連星進化で宇宙年齢内に合体する連星の Chirp mass $M_{chirp} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ の分布



**GW150914の
 $M_{chirp} \sim 28 M_{\text{太陽}}$**

Z=0 初代星

初代星でない場合には典型的な質量は10 $M_{\text{太陽}}$ 以下

(Kinugawa et al.2014)

質量の小さい連星の方が見える距離が短い

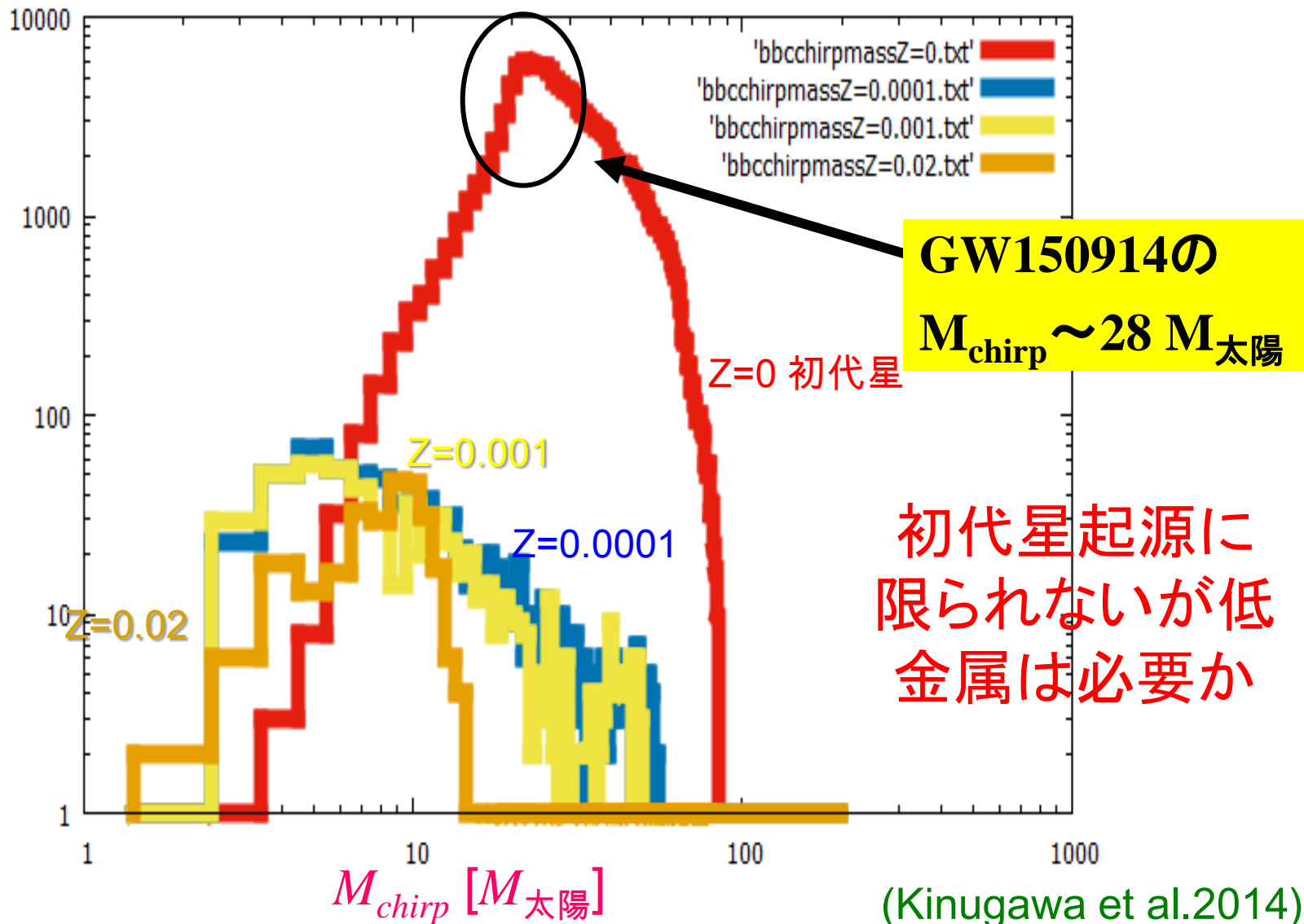
$$\tilde{h}(f) \approx 10^{-21} f^{-1} \left(\frac{f}{10^5 \text{ Hz}} \right)^{-1/6} \left(\frac{M_{\text{chirp}}}{M_{\text{太陽}}} \right)^{5/6} \left(\frac{r}{100 \text{ Mpc}} \right)^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

GW151226のようなBH連星が単位体積当たりでは、
GW150914のような連星の10倍程沢山あってもよい

| Mass distribution | $R/(\text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1})$ | | |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | PyCBC | GstLAL | Combined |
| | Event based | | |
| GW150914 | $3.2^{+8.3}_{-2.7}$ | $3.6^{+9.1}_{-3.0}$ | $3.4^{+8.6}_{-2.8}$ |
| LVT151012 | $9.2^{+30.3}_{-8.5}$ | $9.2^{+31.4}_{-8.5}$ | $9.4^{+30.4}_{-8.7}$ |
| GW151226 | 35^{+92}_{-29} | 37^{+94}_{-31} | 37^{+92}_{-31} |
| All | 53^{+100}_{-40} | 56^{+105}_{-42} | 55^{+99}_{-41} |

(衣川君のスライドを一部改変)

10⁶個の連星進化で宇宙年齢内に合体する連星の Chirp mass $M_{chirp} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ の分布



大質量のBH連星の形成シナリオの別の可能性

(ApJ Lett., 818:L22 (2016))

- 星の密度が高い球状星団の中での星の合体

イベントレートがちゃんと説明できるというシナリオもある

(例えば、[arXiv:1604.04254](https://arxiv.org/abs/1604.04254))

- 宇宙初期に形成された原始BHの可能性も完全には否定しきれない

([arXiv:1603.00464](https://arxiv.org/abs/1603.00464), [arXiv:1603.05234](https://arxiv.org/abs/1603.05234))

Primordial black hole scenario for the gravitational wave event GW150914

我々も論文を書いてしまいました

Misao Sasaki^a, Teruaki Suyama^b, Takahiro Tanaka^c, and Shuichiro Yokoyama^d

^a *Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

^b *Research Center for the Early Universe (RESCEU), Graduate School of Science,
The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*

^c *Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

^d *Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan*

arXiv:1603.08338, Phys.Rev.Lett. 117, 061101

Abstract

We point out that the gravitational wave event GW150914 observed by the LIGO detectors can be explained by the coalescence of primordial black holes (PBHs). It is found that the expected PBH merger rate would exceed the rate estimated by the LIGO scientific collaboration and Virgo collaboration if PBHs were the dominant component of dark matter, while it can be made compatible if PBHs constitute a fraction of dark matter. Intriguingly, the abundance of PBHs required to explain the suggested lower bound on the event rate, > 2 events/year/Gpc³, roughly coincides with the existing upper limit set by the non-detection of the CMB spectral distortion. This implies that the proposed PBH scenario may be tested in the not-too-distant future.

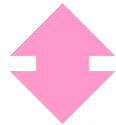
今回の重力波検出から何が言えるのか

- 重力波の直接検出
 - 本当に受かった
 - 本当に伝播してきた
- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホール連星の存在
 - $\sim 10M_{\text{太陽}}$ のブラックホール候補天体X線連星として約20例見つかっているが、これほど重たいBHの存在は明らかではなかった。しかも、かなりたくさん存在しているらしい。
 - $2-100\text{events/year/Gpc}^3$
 - BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよ
いのかの判断は最終的には程度問題ではあるが、

- 数値相対論の進展のおかげでBH連星合体が
高い精度でシミュレーション可能
- この数値計算と観測の間に大きな矛盾はないこ
とは、BHの降着円盤の観測にもとづくこれまでの
の知見以上のものが確かにあるだろう。
- インフレーションが確かめられたかという問と似たよ
うな状況？

「概ね確かめられたと思っているが、Bモードが検出
されればより確実だ」

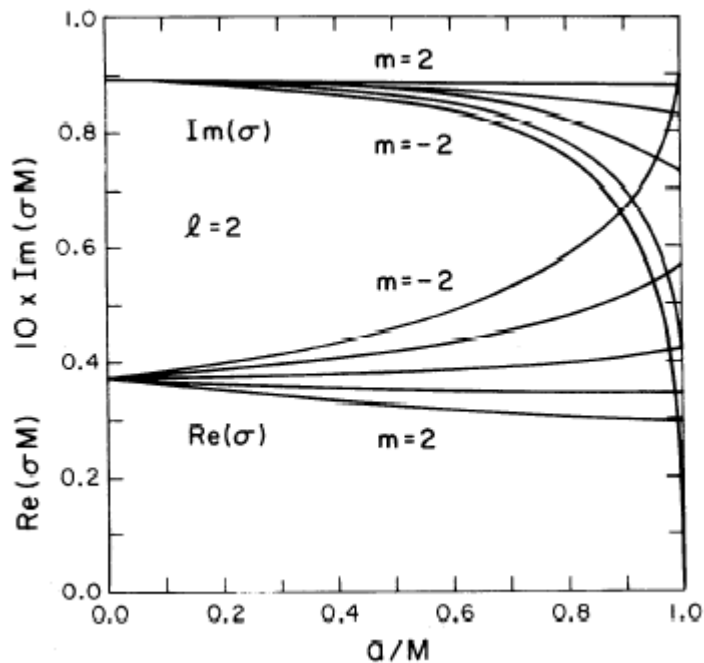
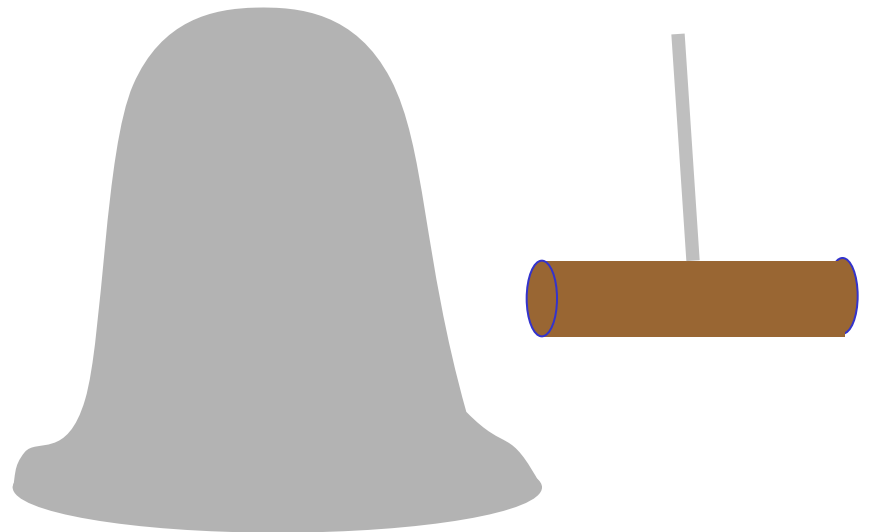


「概ね確かめられたと思っているが、QNMモードが
検出されればより確実だ」

ブラックホールの準固有振動 (QNM)



≈

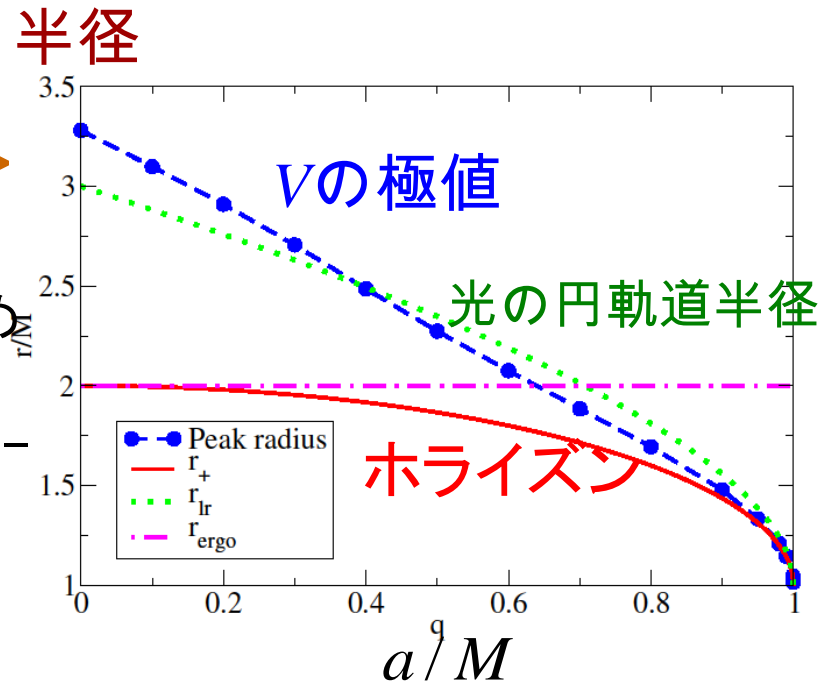
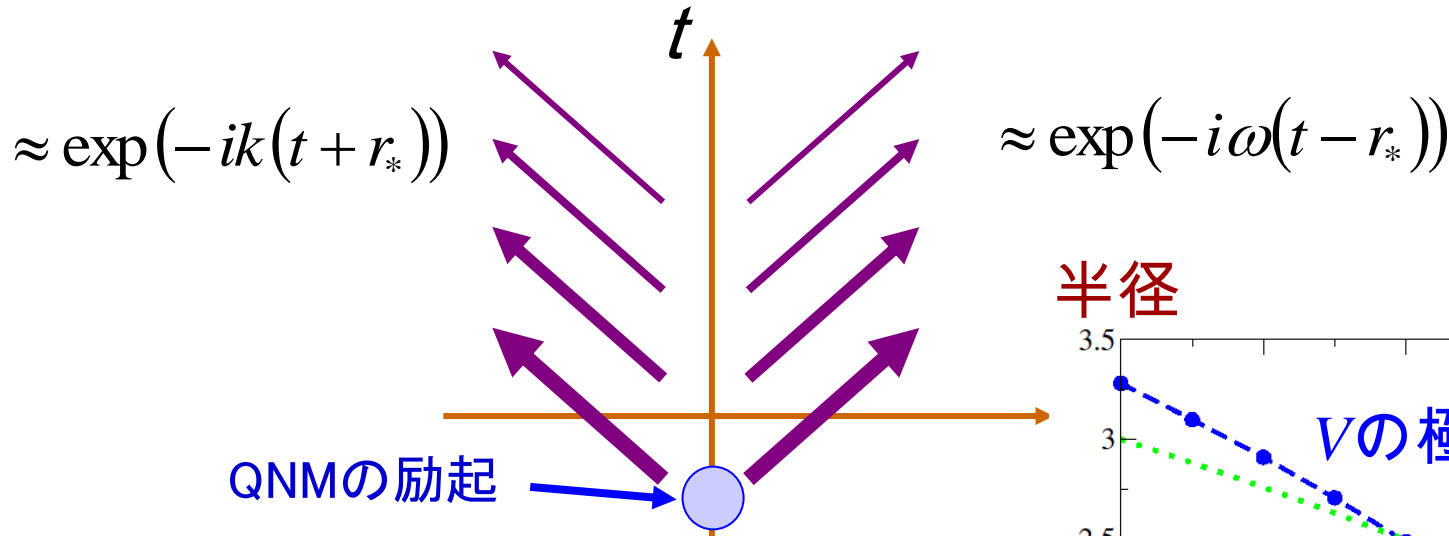


ブラックホールの質量と自転で決まる振動数と減衰率

ブラックホール形成の決定的証拠

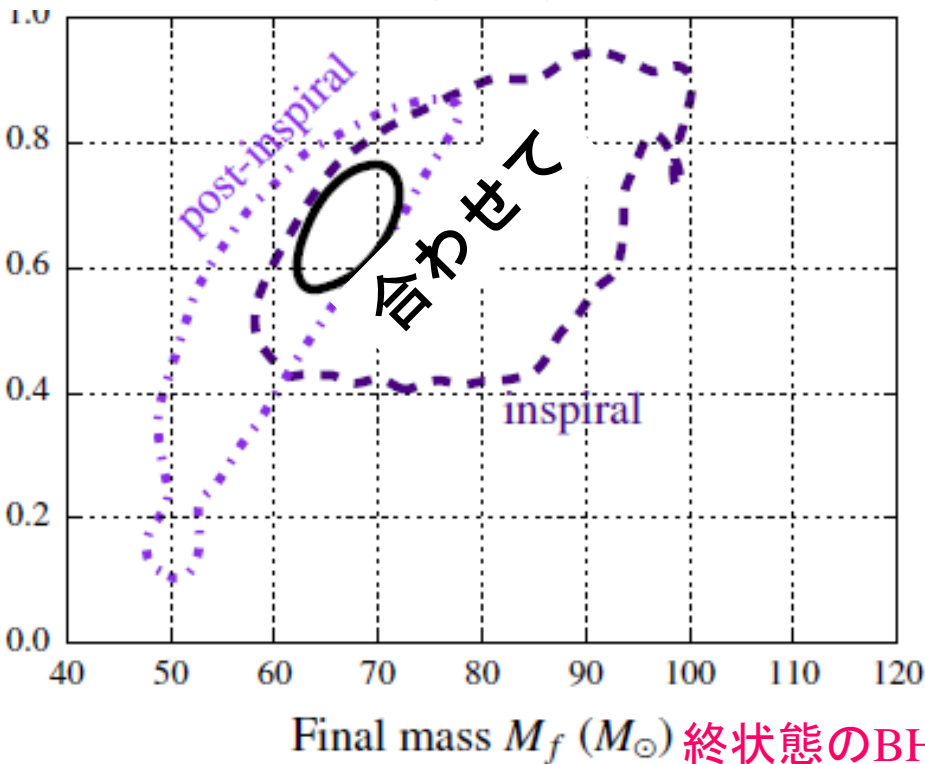
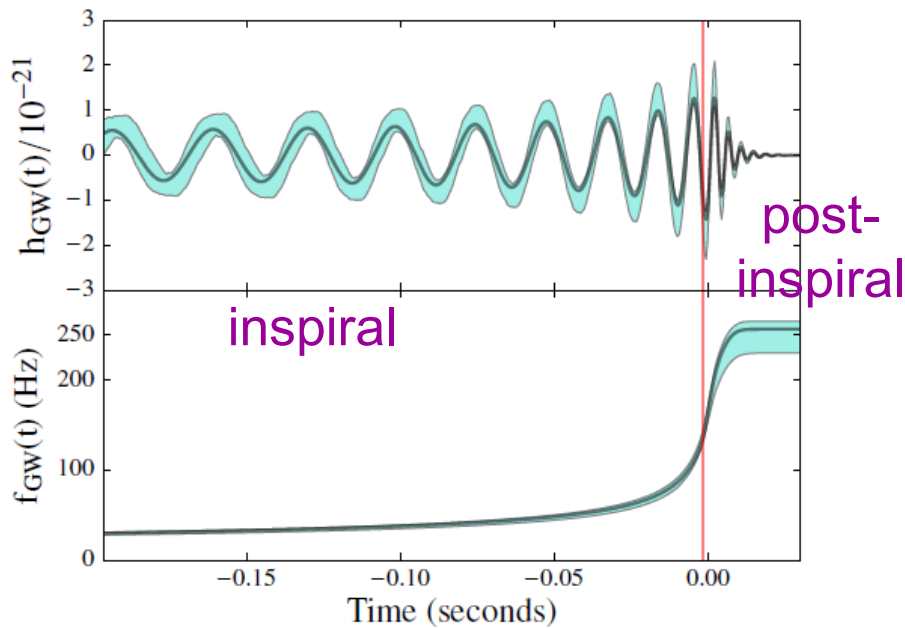
(Detweiler ApJ239 292 (1980))

では、QNMを観測すればブラックホールを どこまで観測したと言えるのか？



(Nakamura, Nakano,
arXiv:1602.02385)

- WKB近似でQNM振動数は比較的正確に求められる
(Schutz & Will, ApJ, 291 (1985))
- しかし、WKB近似の破たんがないと、内側でin-going、外側でout-goingの解は作れない。
- このWKB近似が破れるのは摂動方程式の有効ポテンシャルVの極値周辺。
- WKB近似ではそのまわりの振る舞いだけでQNM振動数が決まる。
- Vの極値がQNMでどこまで見たかの目安を与える
(Nakamura et al., Phys.Rev. D93 (2016))



GW150914の場合

Inspiralとpost-inspiralのそれぞれの領域に分けると、終状態BHの質量とスピンの評価の誤差は大きいので、無矛盾であるという以上に言える段階ではない。

(arXiv:1602.03841)

終状態のBHのスピンの

終状態のBHの質量

GW150914による修正重力に対する制限

| Theoretical Mechanism | GR Pillar | PN | β GW150914 | Example Theory Constraints | | |
|---|-------------------------|------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| | | | | Repr. Parameters | GW150914 | Current Bounds |
| Scalar Field Activation | SEP | -1 | 1.6×10^{-4} | $\sqrt{ \alpha_{\text{EdGB}} }$ [km] | — | 10^7 [39], 2 [40–42] |
| | SEP, No BH Hair | -1 | 1.6×10^{-4} | $ \dot{\phi} $ [1/sec] | — | 10^{-6} [43] |
| | SEP, Parity Invariance | +2 | 1.3×10^1 | $\sqrt{ \alpha_{\text{CS}} }$ [km] | — | 10^8 [44, 45] |
| Vector Field Activation | SEP, Lorentz Invariance | 0 | 7.2×10^{-3} | (c_+, c_-) | (0.9, 2.1) | (0.03, 0.003) [46, 47] |
| Extra Dimension Mass Leakage | 4D spacetime | -4 | 9.1×10^{-9} | ℓ [μm] | 5.4×10^{10} | 10 – 10^3 [48–52] |
| Time-Varying G | SEP | -4 | 9.1×10^{-9} | $ \dot{G} $ [$10^{-12}/\text{yr}$] | 5.4×10^{18} | 0.1–1 [53–57] |
| Massive graviton | massless graviton | +1 | 1.3×10^{-1} | m_g [eV] | 1.2×10^{-22} [12] | 10^{-29} – 10^{-18} [58–62] |
| Modified Dispersion Relation (Modified Special Relativity) | $v_g = c$ | +5.5 | 2.3×10^2 | $\Lambda > 0$ [1/eV] | 1.6×10^{-7} | — |
| Modified Dispersion Relation (Extra Dimensions) | $v_g = c$ | +5.5 | 2.3×10^2 | $\Lambda < 0$ [1/eV] | 1.6×10^{-7} | 2.7×10^{-36} [63] |
| Modified Dispersion Relation (Lorentz Violation) | SEP, Lorentz Invariance | +7 | 8.7×10^2 | $\Lambda > 0$ [1/eV ²] | 9.3×10^4 | — |
| | | +7 | 8.7×10^2 | $\Lambda < 0$ [1/eV ²] | 9.3×10^4 | 4.6×10^{-56} [63] |
| | | — | — | c_+ | 0.7 [64] | (0.03, 0.003) [46, 47] |

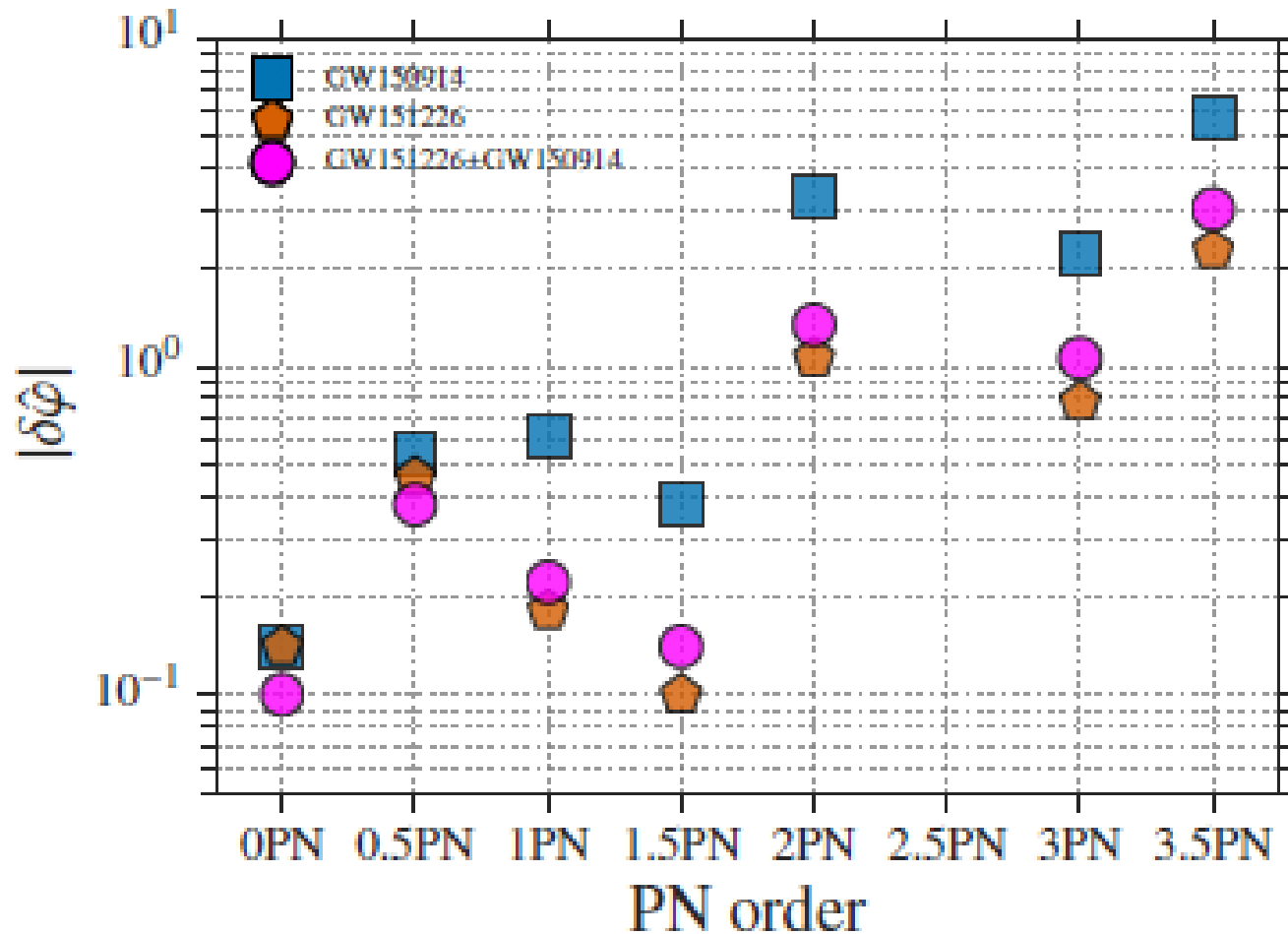
$$\tilde{h}_i(f) = A_i(f) e^{i\Phi_i(f)}. \quad \delta\Phi_{\text{I,ppE}}(f) = \beta (\pi \mathcal{M} f)^{b/3}$$

(Yunes, et al., arXiv:1603.08955)

重力子のCompton波長に対する制限は太陽系での制限を少し上回っている。

精度の向上にはinspiral phaseでの長期間の観測が必要
 \Rightarrow space interferometer

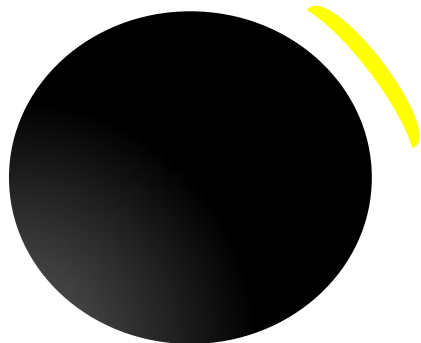
GW151226が加わったことによる修正重力に対する制限



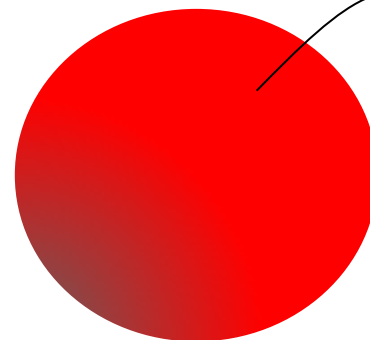
1PN係数への制限は5倍くらい厳しくなった

通常のScalar-tensor 理論

BH no hair



ツルツル



NS は毛があってもよい

Einstein dilaton Gauss-Bonnet, Chern-Simons gravity

$$S \supset \frac{\alpha}{G_N} \int d^4x \sqrt{-g} \theta \left(\begin{array}{c} R_{GB} \\ *RR \end{array} \right) - \frac{1}{2G_N} \int d^4x \sqrt{-g} [(\partial\theta)^2 + 2V(\theta)]$$

$\theta \times$ (higher curvature)

$$R_{GB} = R^2 - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R^{\alpha\beta}{}_{\mu\nu}R^{\mu\nu}{}_{\alpha\beta}$$

$$*RR = \varepsilon^{\alpha\beta}{}_{\sigma\chi} R^{\sigma\chi}{}_{\mu\nu} R^{\mu\nu}{}_{\alpha\beta}$$

- θ が定数であれば、これらの高階微分の項はtopological invariantとなり、運動方程式には現れない。
- 高階微分項が効くのは曲率が大きい強い重力場でのみ。

Hairy BH - bold NS

- EDGBにおいてNSはscalar chargeを持たない

$$\square\theta \approx "R^2" \rightarrow Q = \int d^3x "R^2" = \frac{1}{T} \int \underline{d^4x "R^2"}$$

topological invariant, which vanishes on topologically trivial spacetime.

- 逆に, EDGBとCSでは、BHがそれぞれmonopole chargeとdipole chargeを持つ

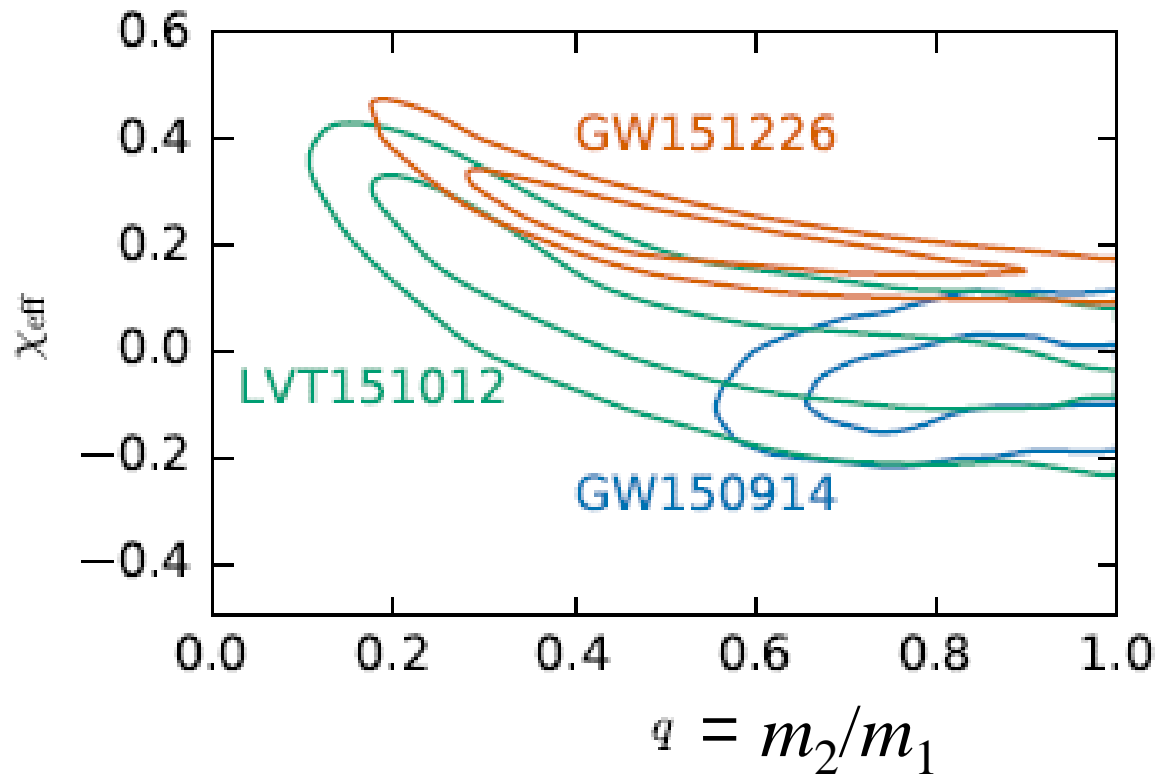
EDGB : monopole charge \rightarrow dipole radiation (-1PN order)

CS : dipole charge \propto spin \rightarrow 2PN order

(Yagi, Stein, Yunes, Tanaka (2012))

しかし、GW150912から制限されるパラメータ領域はstrong couplingになってしまうため、意味がなさそう。

Constraint on the initial spin



(arXiv:1606.04856)

Spin strongly degenerates with the mass ratio, but GW151226 is likely to have initial spin.

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{J_1/m_1 + J_2/m_2}{M} \quad \text{averaged spin parallel to the orbital angular momentum}$$

重力波伝播への修正：単純に graviton に mass を与える

phase velocity of massive graviton

$$c_{phase}(f) = \frac{k}{\omega} \approx 1 - \frac{m^2}{2\omega^2} = 1 - \frac{1}{2\lambda_g^2 f^2}$$

$$D = \int d\eta a^2$$

→ $\Delta\Psi = 2\pi f \Delta t = 2\pi f D \Delta c_{phase}(f) \approx -\frac{\pi D}{\lambda_g^2 f}$

Phase shift が
周波数依存

$$\Psi = \dots + \frac{3}{128} (\pi M f)^{-5/3} \left[1 + \left(\frac{3715}{756} + \frac{55}{9} \eta - \frac{128}{3} \eta \beta_g \right) u^{2/3} - (16\pi - \beta) u + \dots \right]$$

$u = \pi M f = O(v^3)$

Graviton mass effect

$$\beta_g = \frac{\pi^2 D M}{\lambda_g^2}$$

Constraint from future observations:

LISA – $10^7 M_\odot$ BH + $10^6 M_\odot$ BH @ 3Gpc:

graviton compton wavelength

$$\lambda_g > 4 \text{ kpc}$$

(Yagi & TT, arXiv:0908.3283)

Massive gravity

$$\square h_{\mu\nu} = 0 \quad \longrightarrow \quad (\square - m^2) h_{\mu\nu} = 0$$

単純な graviton mass term は理論として問題有？

→ ghost, instability, etc.

Bi-gravity

$$\frac{L}{M_G^2} = \frac{\sqrt{-g} R}{16\pi} + \frac{\sqrt{-\tilde{g}} \tilde{R}}{16\pi\kappa} + \frac{L_{matter}(g, \phi)}{M_G^2} + \dots$$

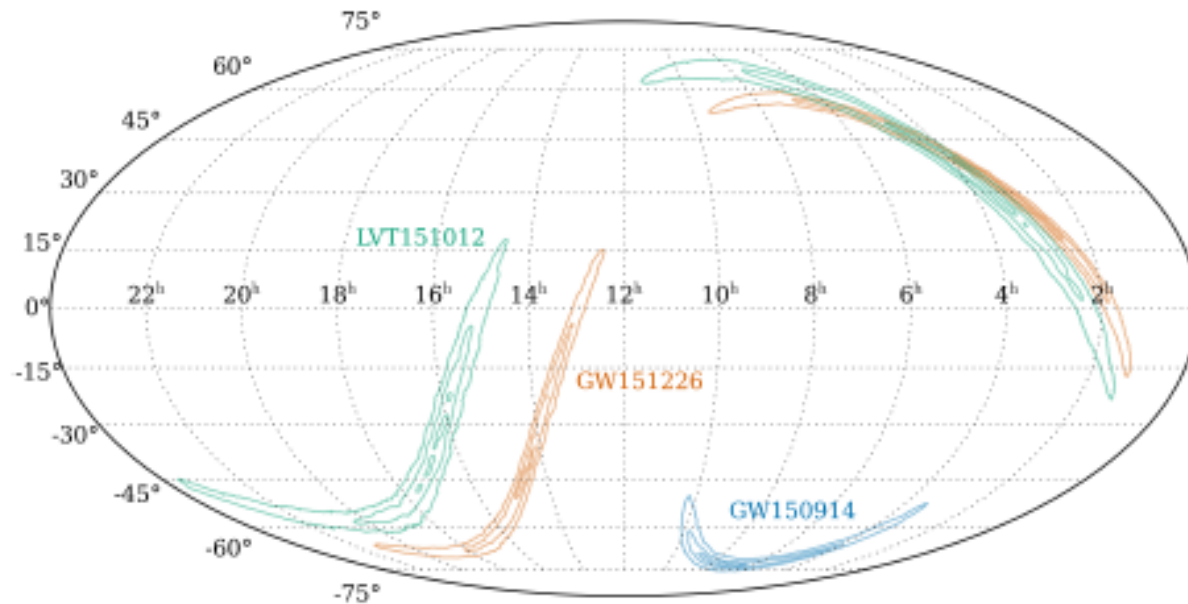
massive と massless、二つの graviton が存在

→ ν 振動に似た現象が起こる？

- 1) Ghost-free bigravity model は存在する。
- 2) FLRW背景時空はGRの場合と低エネルギー領域で非常によく似た振る舞いをする。
- 3) 非線形効果により massive graviton が励起されない mechanism が存在することが示唆される。
- 4) 二つの分散関係の eigen modes は二つの metric perturbation の重ね合わせ。
 - mass eigen states @ low frequencies
 - $\delta\tilde{g}$ and δg themselves @ high frequencies.入れ替わりが起こる critical frequency は密度に依存。
- 5) Graviton oscillations は critical frequency 付近でしか起こらない z だが、観測されるチャンスはある。

対応天体のフォローアップ観測

- 合体時刻の情報
- 天球上の位置情報



GW150914の場合

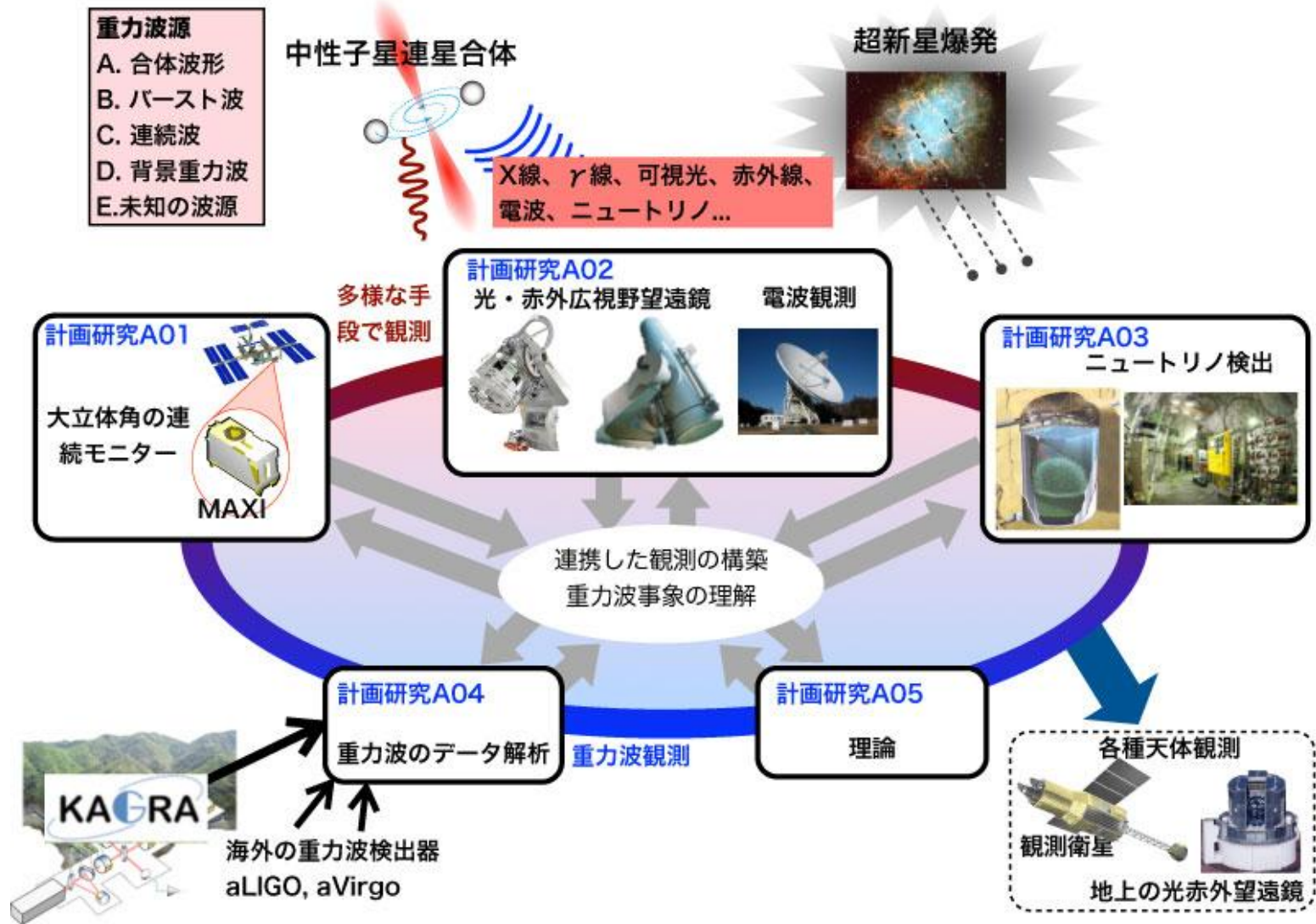
- 2台の検出器の間の7m秒の時間差で決まる円周上に制限される
- 感度の方向依存性と
のマッチング

⇒ **600平方度** (90%)
(2月の発表時)

⇒ **230平方度** (90%)
(6月の論文)

GW151226では
850平方度 (90%)

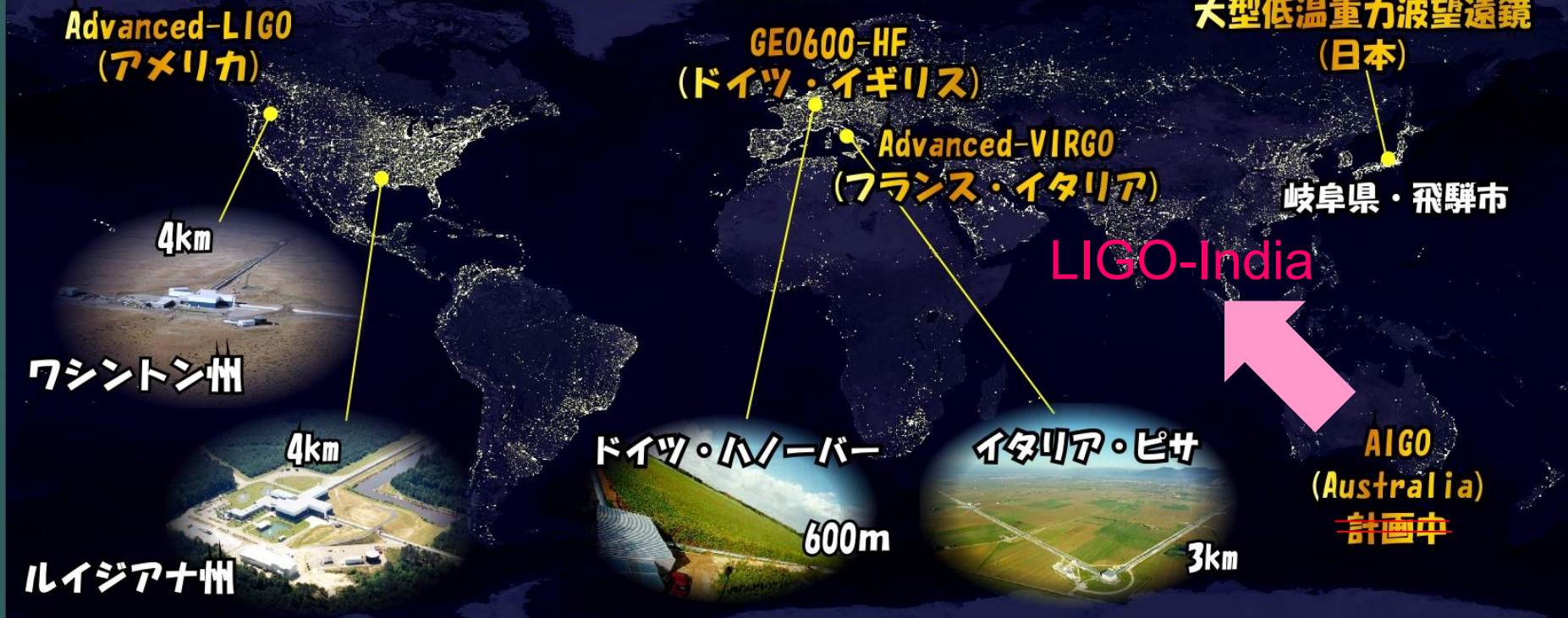
日本では新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」(2012-2016年度)を中心に組織化



J-GEM と LIGO/VIRGO の間でMOUが交わされている

今後の展開

次世代重力波観測ネットワーク



位置決定精度の向上

中性子星連星の位置決定精度

複数台の重力波同時検出によってエラーボックスを小さくできる。

重力波データ解析からは5-10分での速報を目指している

KISS (1.05m) 4deg²
PTF (1.2m) 7deg²
Subaru-HSC(8.2m) 1.75deg²
LSST (8.4m) 9.4deg²

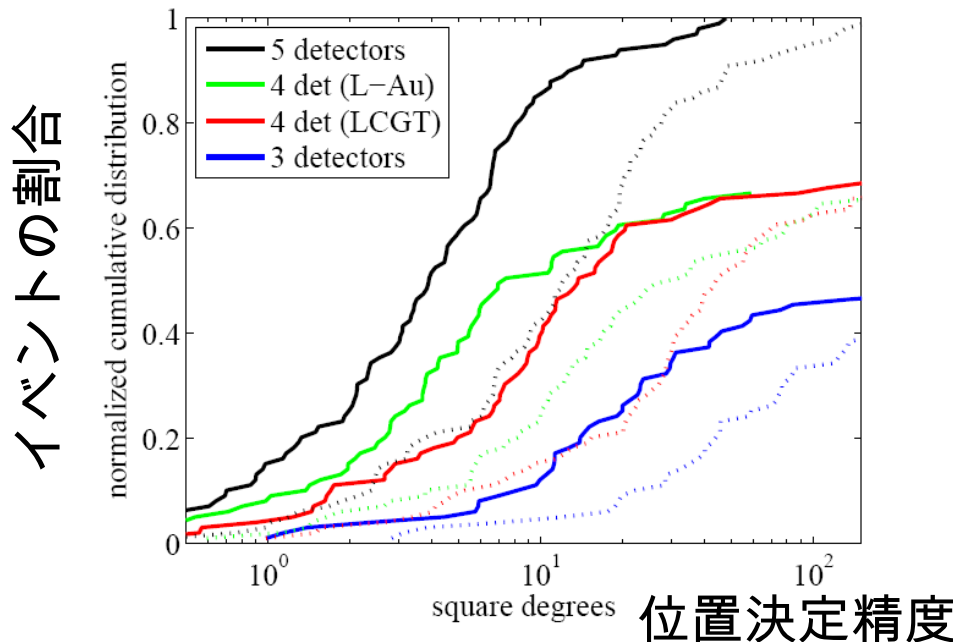


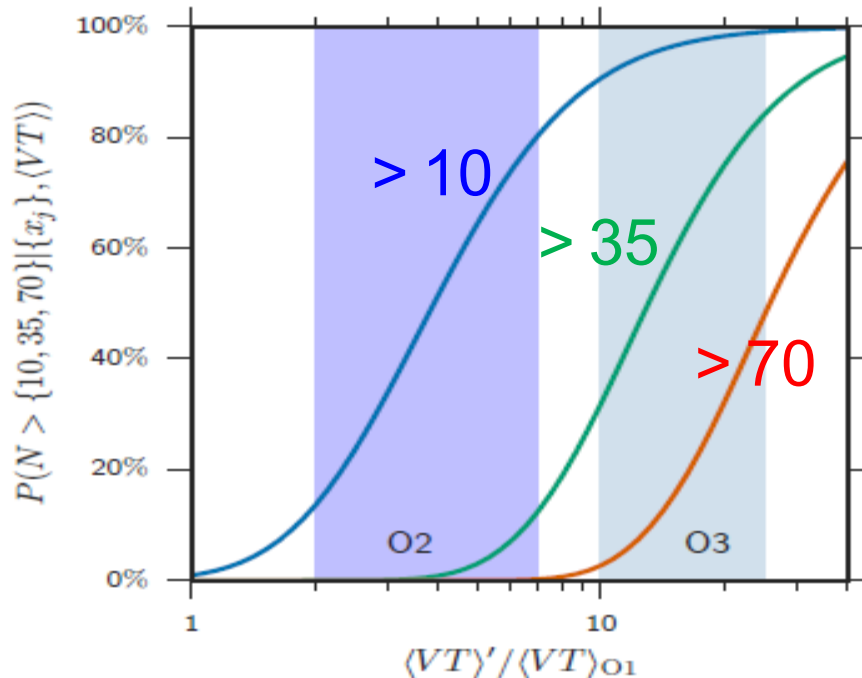
FIG. 3.— Normalized cumulative distributions as a function of the sky-error area (square degrees) of a sample of NS-NS binaries in Case I detection scenario. Key: Solid/dotted lines denote 68% and 95% confidence regions respectively. Black: LIGO+Virgo+LAU+LCGT network, green: LIGO+Virgo+LAU, red: LIGO+Virgo+LCGT, and blue: LIGO+Virgo only.

(Nissanke, Sievers, Dalal, Holz arXiv:1105.3184)

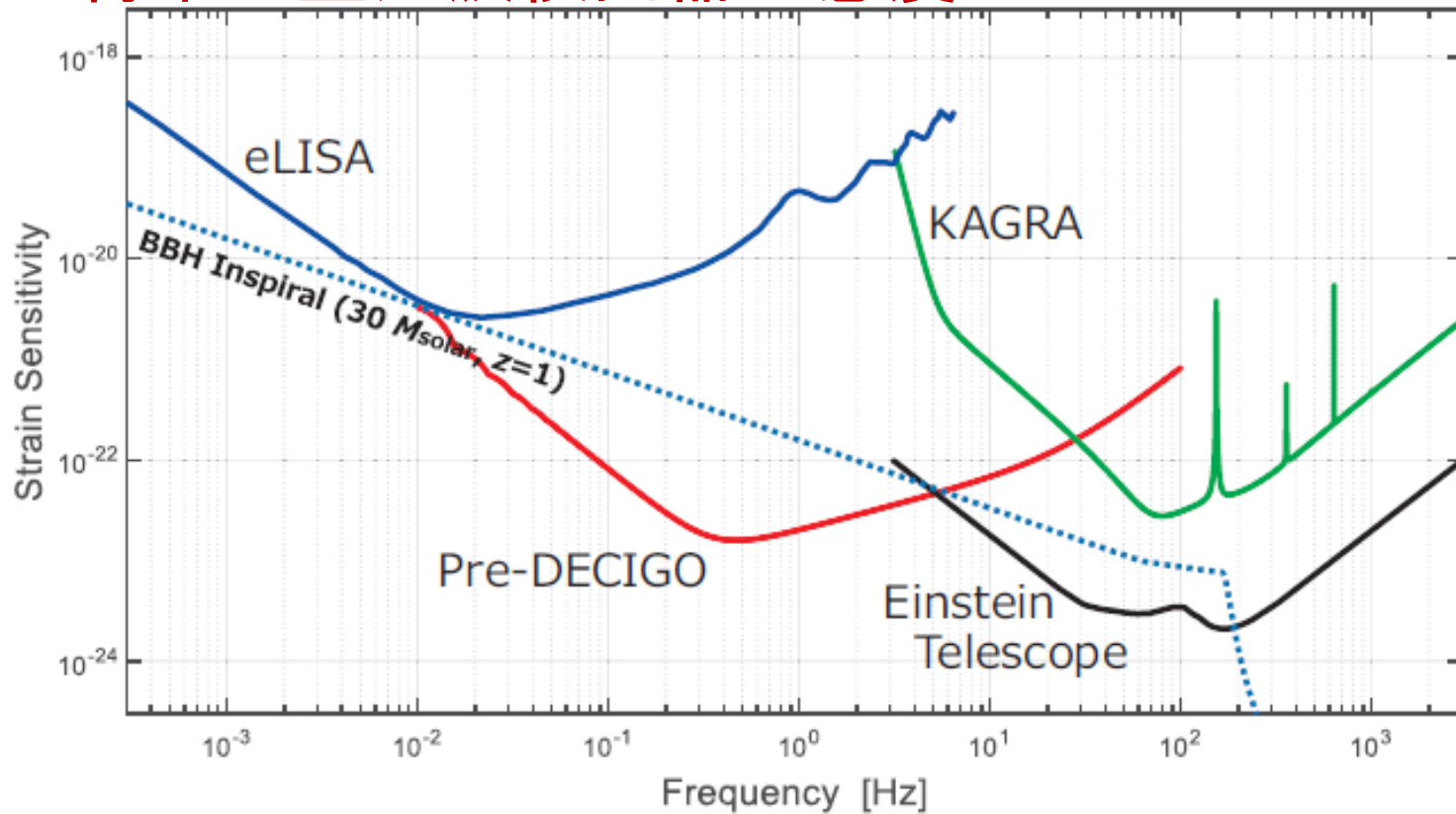
高いイベントレートが期待される

advLIGOは感度がさらに3倍向上
干渉計の台数が4台、5台となる
長時間の定常的な観測

⇒ $S/N > 100$ のイベントも期待できる



将来の重力波検出器の感度



$$h_c = 1.89 \times 10^{-21} (1+z)^{5/6} \left(\frac{M_c}{26.1 M_\odot} \right)^{5/6} \left(\frac{\nu}{0.1 \text{ Hz}} \right)^{-1/6} \left(\frac{d_L(z)}{1 \text{ Gpc}} \right)^{-1} \propto (1+z)^{-1/6}$$

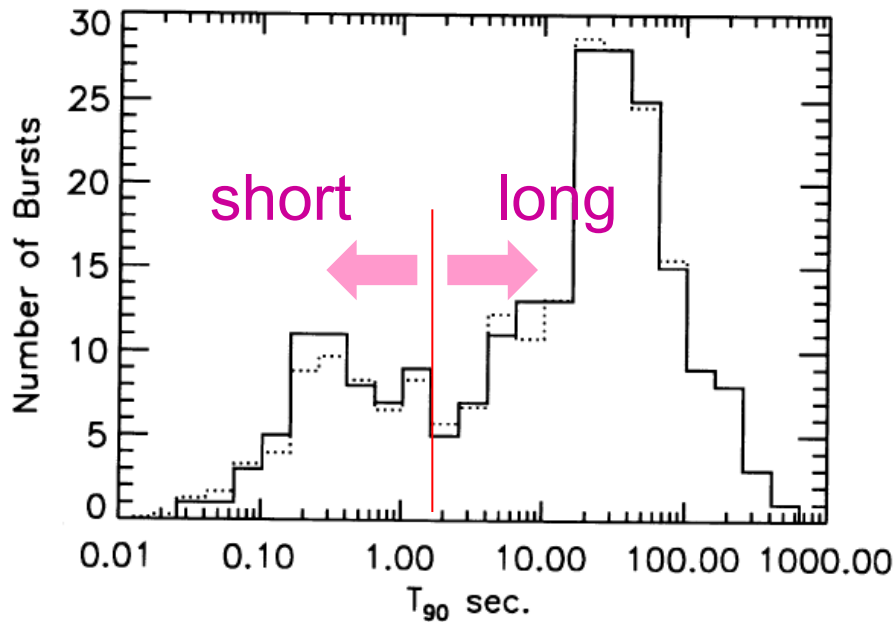
for $z \gg 1$

$z=30$ でも検出可能

⇒ Sourceのredshift分布からBBH形成シナリオを区別可能
高い方向決定精度で事前に連星の方向を予言

(arXiv:1607.00897)

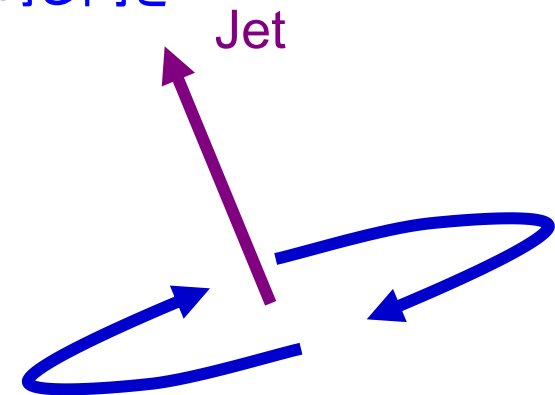
NS-NS Binary coalescence = short γ ray bursts?

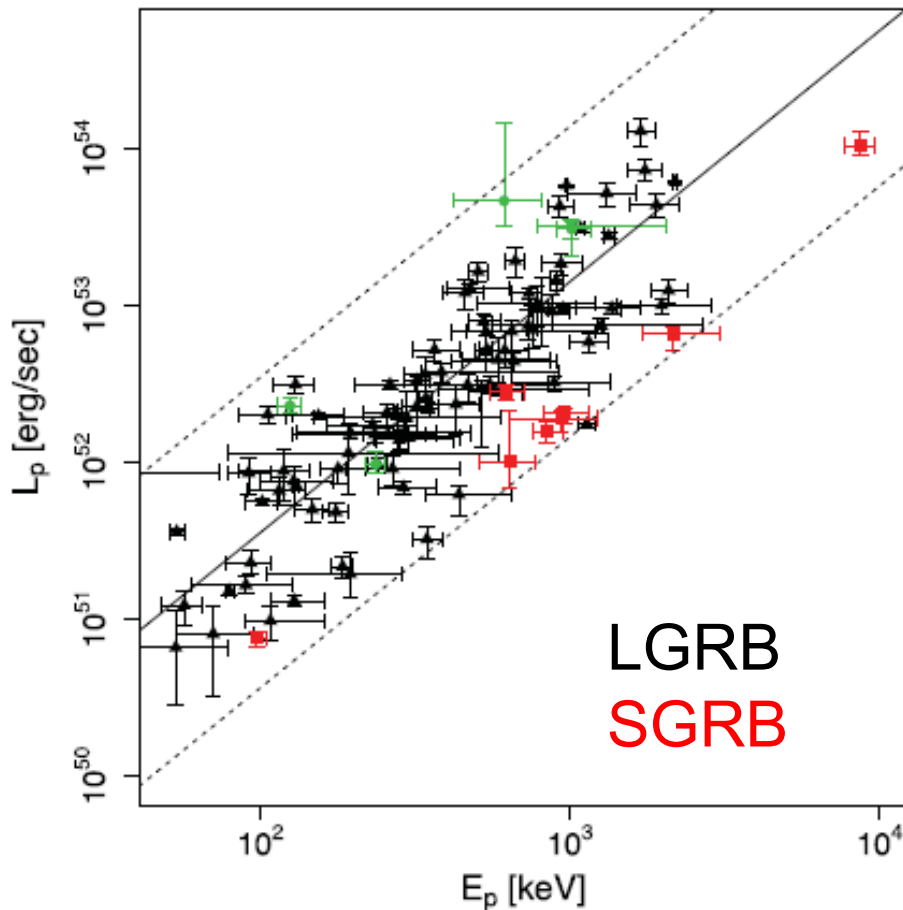


Jetの方向とbinaryの回転軸はおそらく同じ向き

最大の重力波のamplitude
しかも、時間や方向がknown

→ 低いS/Nでも検出可能
(~ 2.4倍遠くまで見える)





$E_{peak}-L_{peak}$ correlation
(いわゆる Yonetoku relation)
がSGRBにも拡張される

(Tsutsui et al. (2013))

$E_{peak}-L_{peak}$ correlation を
BATSEのデータに適用して
SGRBのレートを評価

(Yonetoku et al. 1402.5463)



SGRBがNS-NS (NS-BH) 連星合体であるなら,

$3.9^{+1.9}_{-2.4}(152^{+75}_{-94})$ events/yr for advanced detector networkが期待される

連星中性子星のイベントレートの予想

$0.4 \sim 400\text{yr}^{-1}$ for advLIGO/Virgo (Abadie et al. 2010)

[その後、1/5に修正されているが]とconsistent

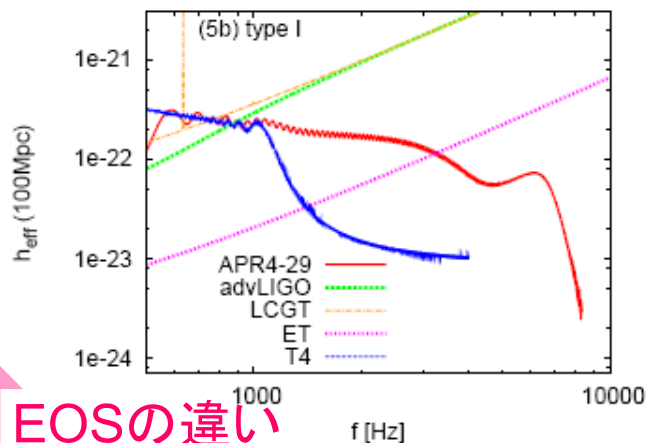
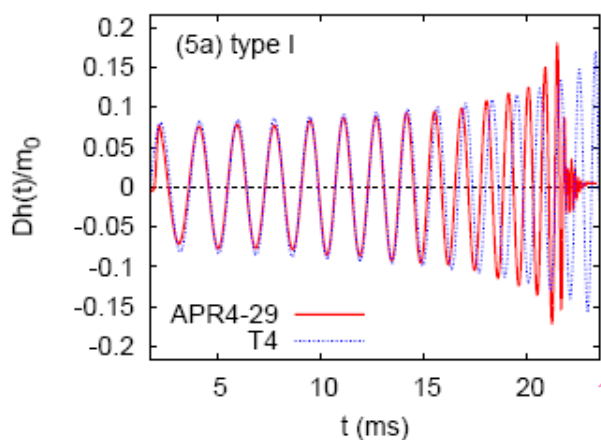
重力波波形からNSを調べる

数値相対論による

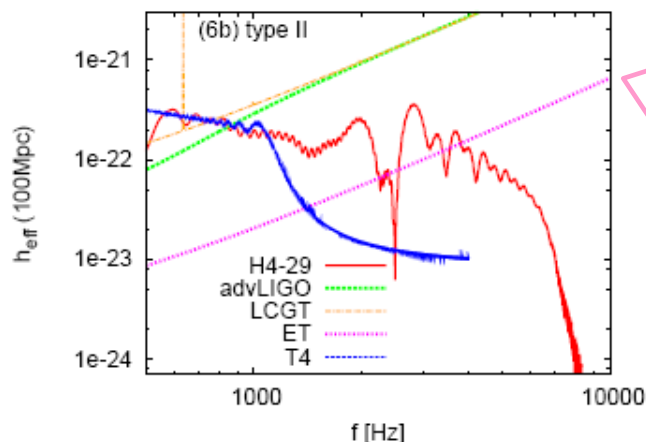
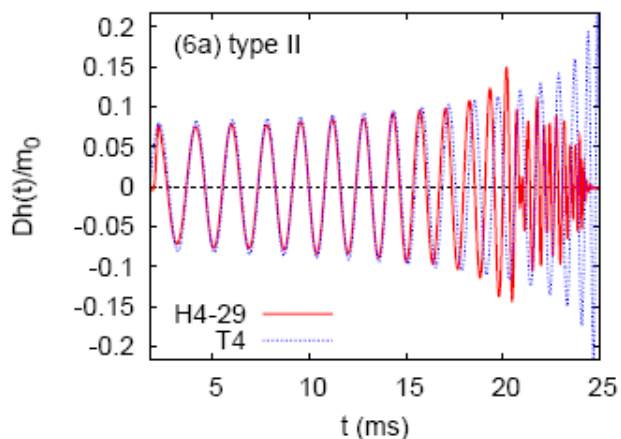
1.45 M_{\odot} NS-NS連星@100Mpcの合体波形予測

(Hotokezaka et al. (2011))

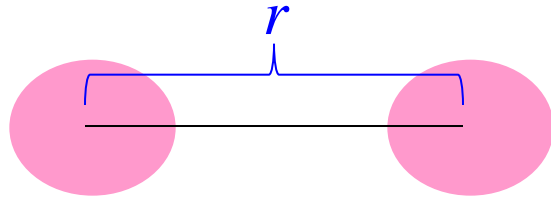
回転する巨大NSがtentativeに形成されて重力波を出す。
波形はEOSに非常に依存している。



EOSの違い



450Hz以下の感度の高い領域で区別できないか？



潮汐力($1/r^3$) × 潮汐変形($1/r^3$)
 \propto 潮汐エネルギー($1/r^6$)

ニュートン重力の束縛エネルギー($1/r$)と比べると5PN($1/r^5$)オーダー

潮汐力のinspiral波形への影響の観測可能性の評価

EOSがstiffで

typical NSの半径 > 13 km

ならば、200 Mpc での合体イベントから
NSの半径が ≈ 1 km (2- σ) で決まる。

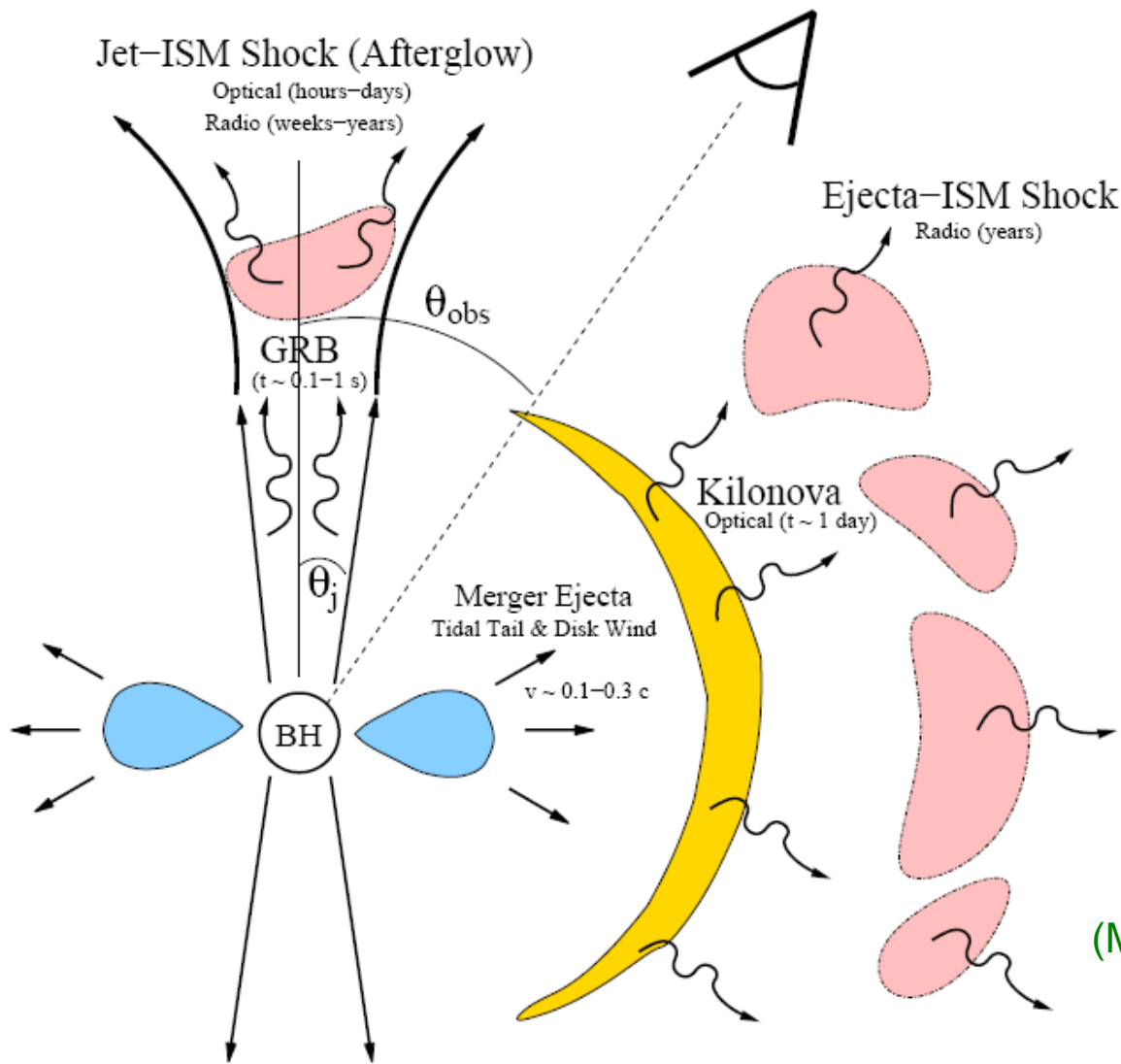
EOSがsoftで

typical NSの半径 < 12 km

の場合にはそれ以上絞ることは難しい。

(Hotokezaka et al., 1603.01286)

電磁波対応天体の探索



重力波検出の
Confirmation

新しい天文学を拓く

ビーミングされていない
4π の放射が有利

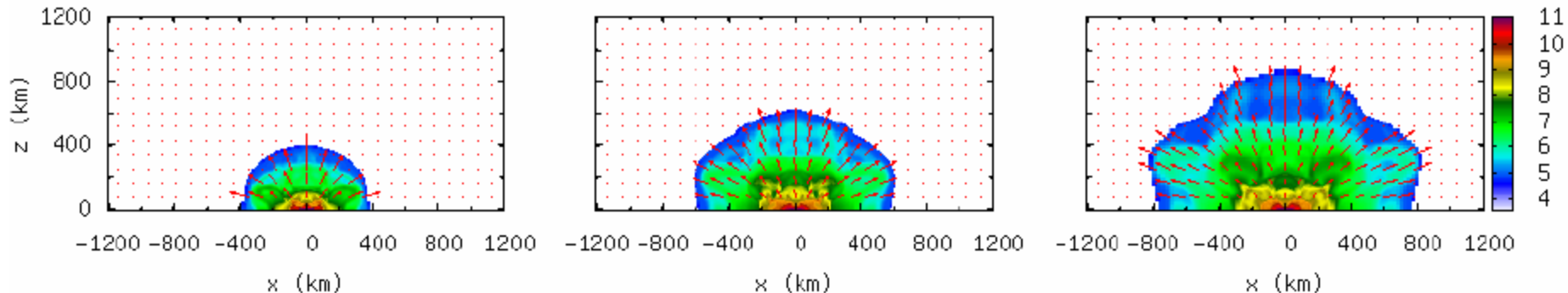
(Metzger and Berger 1108.6056)

NS-NS, NS-BHの合体では何らかの電磁波シグナルが放出されることが期待される。
何か見えるはずだと考えると、正体不明のSGRBと関係がある可能性が有力。

Macronova/Kilonova,

中性子星連星合体の際に放出される中性子過剰物質

⇒ r -processによる元素合成 ($A > 130$)



$1.35M_{\odot} + 1.35M_{\odot}$ やわらかいが $2M_{\odot}$ を支えられるEOM

(Hotokezaka et al. 1212.0905)

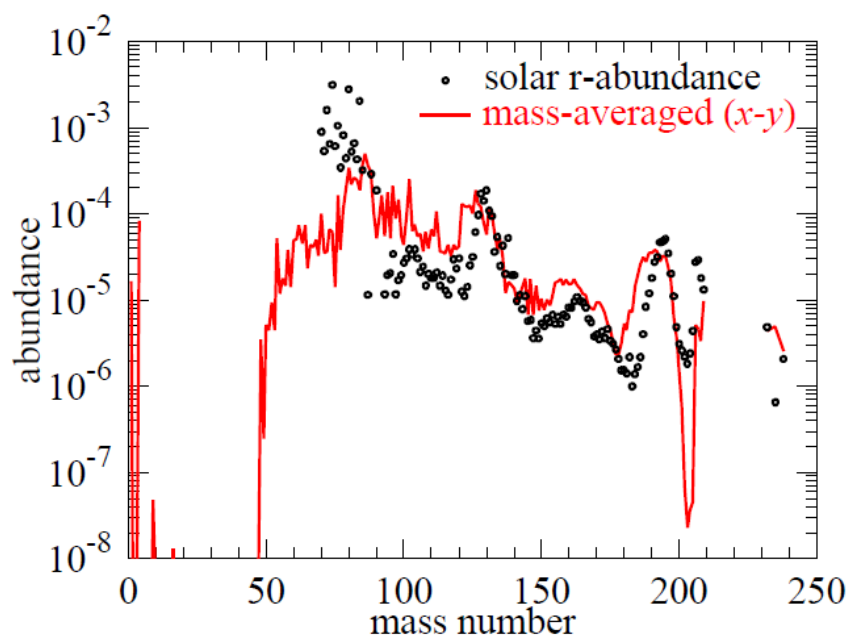
$\sim 0.2c$

$\sim 10^{-4} - 10^{-2} M_{\odot}$ の ejecta mass

潮汐力による質量放出(NS半径大(stiff EOS))

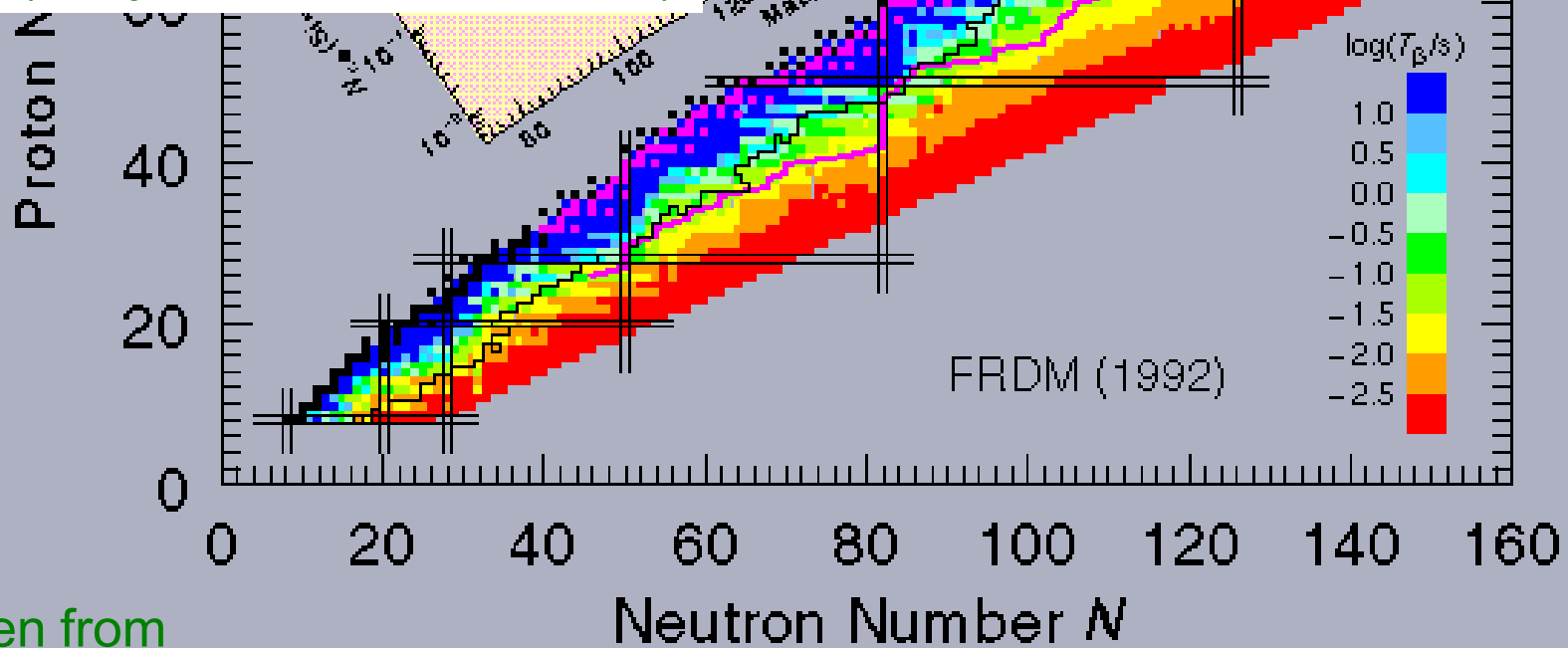
とショックによる質量放出(NS半径小(soft EOS))

NS半径小 \Leftrightarrow 質量放出大



重元素のabundance pattern
と量が説明できそうに見える。

(Wnajo et al., arXiv:1402.7317)



Taken from
<https://t2.lanl.gov/nis/tour/sch005.html>

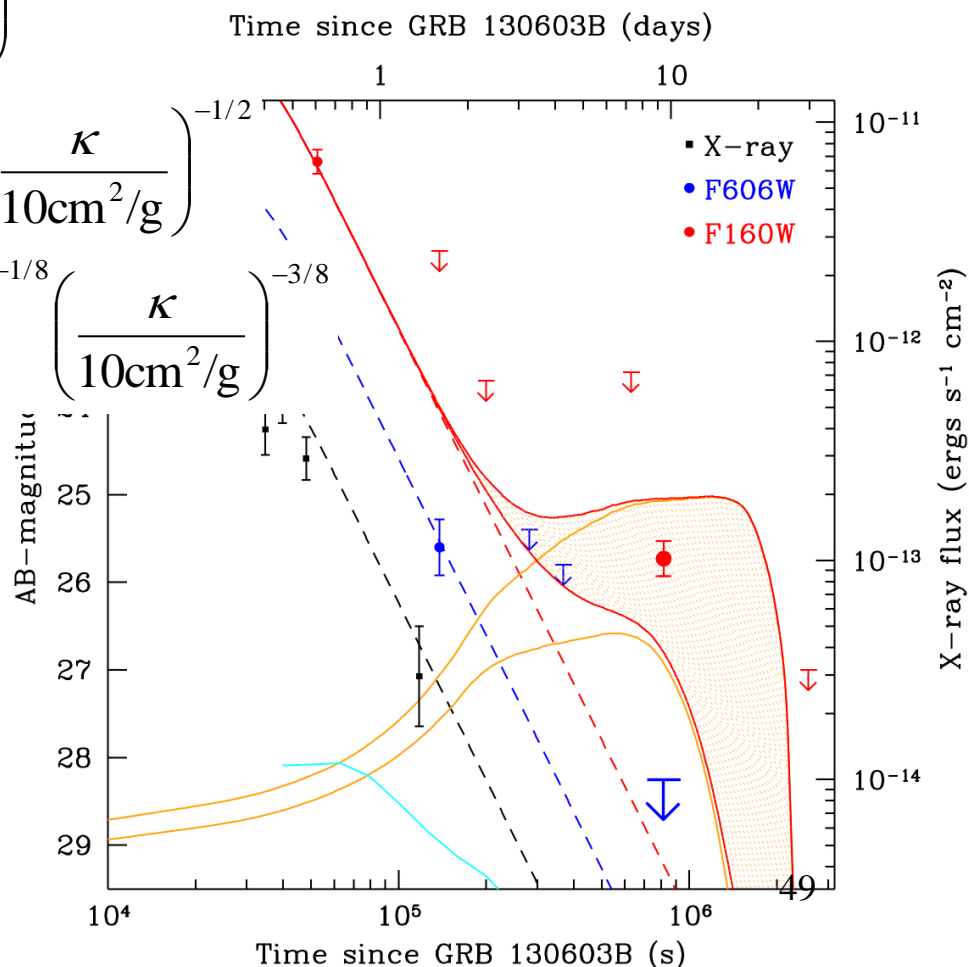
Ejectaの断熱膨張とphotonのdiffusion timeのつり合いから放射のピークの時刻と明るさが見積もられる (Li & Paczynski 1998)

$$t_{peak} \approx 10 \text{ days} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/2} \left(\frac{M}{0.01 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{1/2}$$

$$L_{peak} \approx 10^{41} \text{ erg/s} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right) \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{0.01 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{-1/2}$$

$$T_{peak} \approx 2 \times 10^3 \text{ K} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right)^{1/4} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/8} \left(\frac{M}{0.01 M_{\odot}} \right)^{-1/8} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{-3/8}$$

最初のkilonovaの観測か？
(Tanvir et al. 2013)



まとめ

- 重力波の直接検出がされた
- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホール連星の存在が明らかになった
 - 初代星起源かもしれない
 - BH-QNMが確認される日も近い
- 重力波物理学/天文学の幕開け
 - フォローアップ/複数台による観測の重要性
 - SGRBの正体の解明
 - 中性子星連星合体も当然期待される
 - 高密度核物質の状態方程式
 - r -プロセス元素(金、Pt)の起源
 - 重力理論の検証
 - スペースでの低振動数重力波観測やパルサータイミングアレイ (~年の周期)

他にも様々な重力波源

A. Chirp Signal

NS-NS連星合体

NS-BH連星合体

BH-BH連星合体

中質量BHと太陽質量

天体の合体

BH-MACHO連星の合体

B. Bust Signal

非球対称な超新星爆発

ソフトガンマ線リピータ

の巨大フレア

宇宙紐のcuspやkink等

C. 連続波

非軸対称なパルサー

低質量X線連星

D. 背景重力波

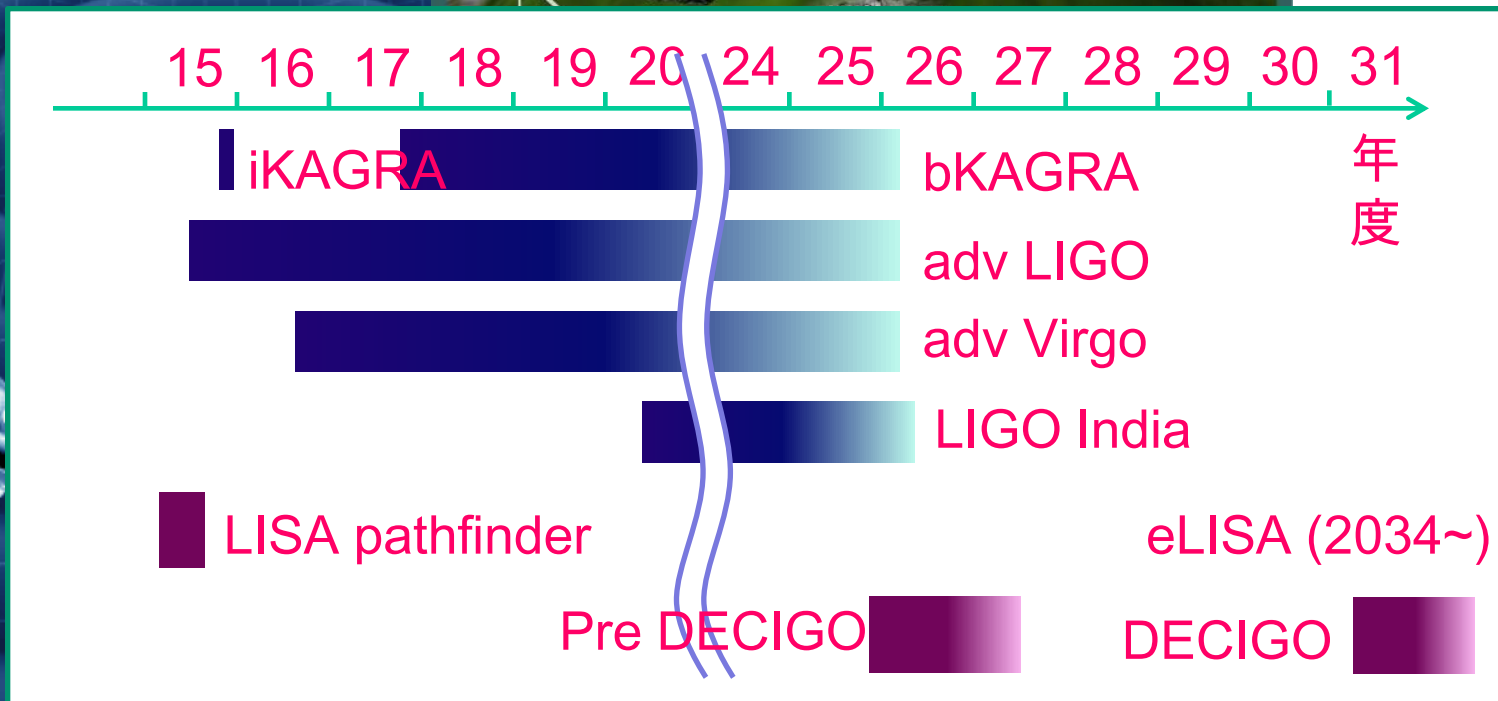
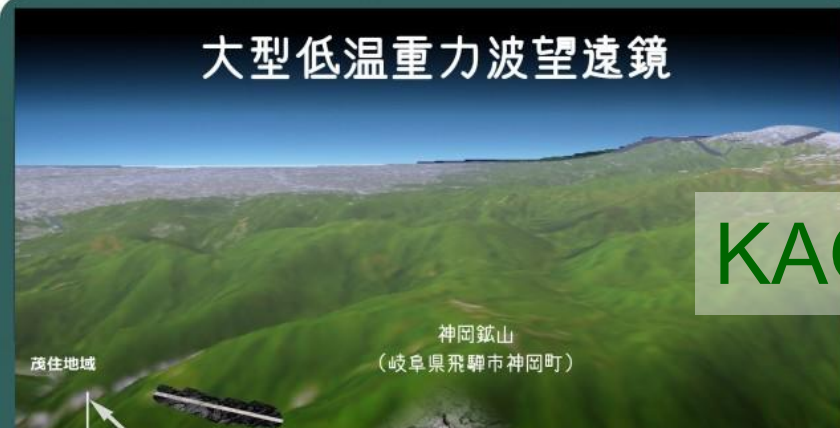
超新星

宇宙紐

宇宙初期の相転移

E. 未知のソース

Gravitation wave detectors

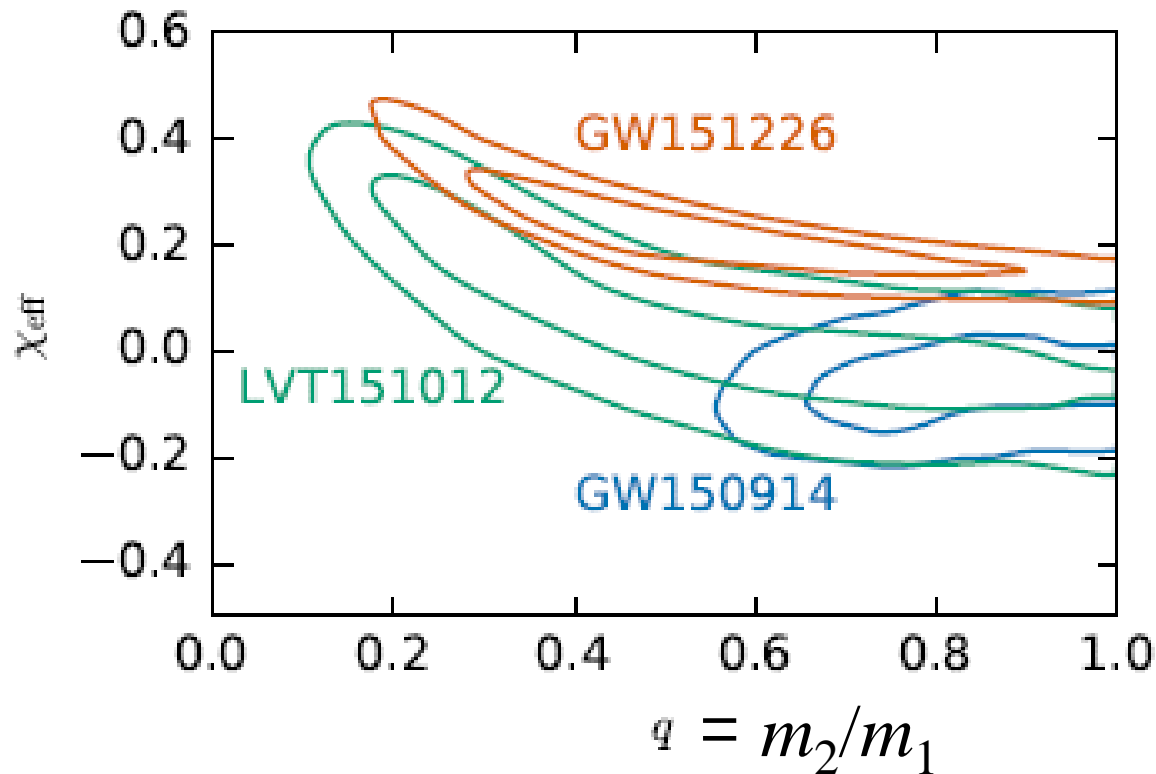


LISA
⇒ DECIGO/BBO



LIGO ⇒ adv LIGO

合体前の自転に対する制限



縮退はあるものの、場合によってはスピンのあることが示される

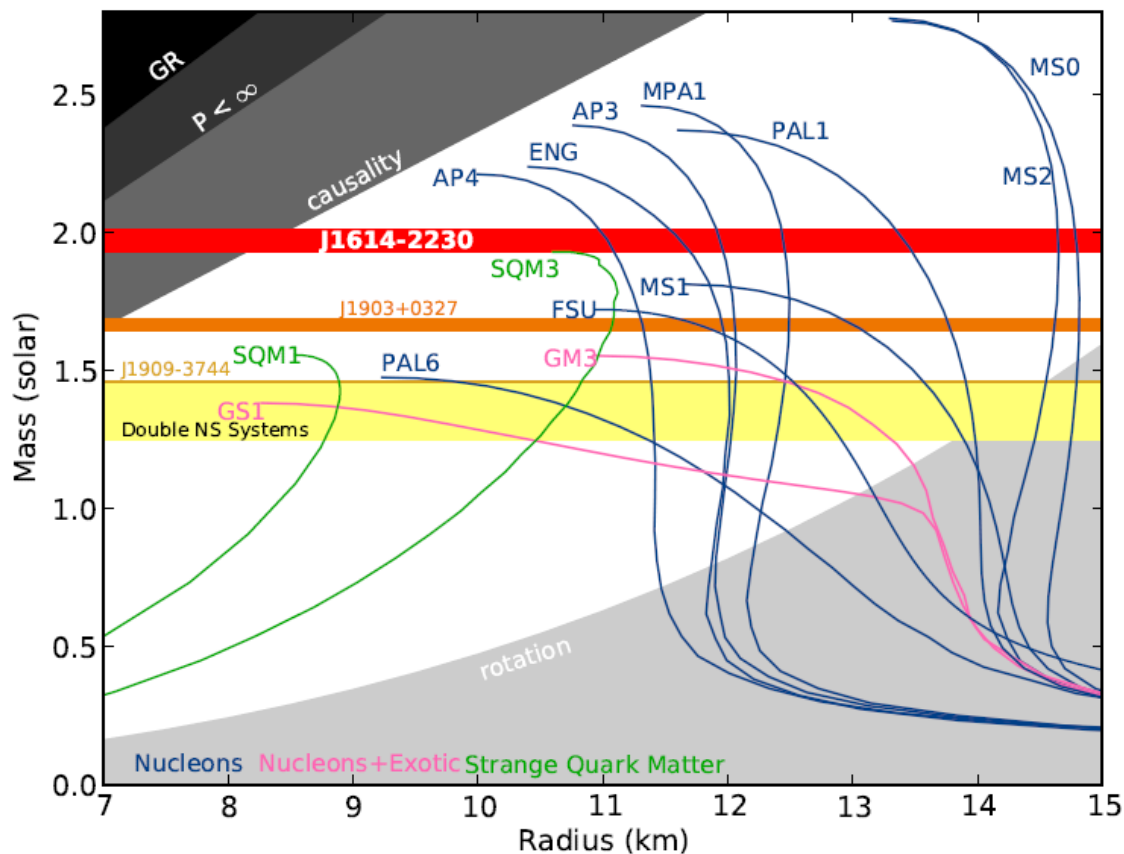
$$\chi_{\text{eff}} = \frac{J_1/m_1 + J_2/m_2}{M}$$

重力波波形からNSを調べる

1.97±0.04M_☉の中性子星の発見(J1614-2230)

(Demorest et al. (2010))

様々な状態方程式が排除される



連星中性子星 合体のイベントレートの推定

発見された連星中性子星で宇宙年齢以内に合体するもの

BINARY SYSTEMS CONTAINING RADIO PULSARS THAT COALESCE IN LESS THAN 10^{10} yr

| PSR | P (ms) | P_b (hr) | e | Total Mass (M_{\odot}) | τ_c (Myr) | τ_{GW} (Myr) | Reference |
|-------------------------------|-------------|---------------|-------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|
| J0737-3039A | 22.70 | 2.45 | 0.088 | 2.58 | 210 | 87 | Burgay et al. 2003 |
| J0737-3039B | 2773 | 2.45 | 0.088 | 2.58 | 50 | 87 | Lyne et al. 2004 |
| B1534+12 | 37.90 | 10.10 | 0.274 | 2.75 | 248 | 2690 | Wolszczan 1990 |
| J1756-2251 | 28.46 | 7.67 | 0.181 | 2.57 | 444 | 1690 | This Letter |
| B1913+16 | 59.03 | 7.75 | 0.617 | 2.83 | 108 | 310 | Hulse & Taylor 1975 |
| B2127+11C | 30.53 | 8.04 | 0.681 | 2.71 | 969 | 220 | Anderson et al. 1990 |
| J1141-6545 [†] | 393.90 | 4.74 | 0.172 | 2.30 | 1.4 | 590 | Kaspi et al. 2000 |

} double pulsar

← NS-WD

NOTES.—One NS-WD (†) and five DNS systems. PSR B2127+11C is in a globular cluster, implying a different formation history to the Galactic DNS systems. Here τ_c is the pulsars' characteristic age and τ_{GW} is the time remaining to coalesce due to emission of gravitational radiation. The total coalescence time is $\tau_c + \tau_{\text{GW}}$.

(Faulkner et al ApJ 618 L119 (2005))

total coalescence time

$$\tau_c + \tau_{\text{GW}}$$

$$E_{\text{回転}} \propto \omega^2$$

$$\dot{E}_{\text{回転}} \propto \omega^4 \propto \omega \dot{\omega}$$

双極放射

$$\dot{\omega} = \frac{A}{2} \omega^3$$

定数

$$\frac{d}{dt} \frac{\omega}{\dot{\omega}} = \frac{d}{dt} \frac{1}{A \omega^2} = -2 \frac{\dot{\omega}}{A \omega^3} = -2$$

$$\tau_c \approx -\frac{1}{2} \frac{\omega}{\dot{\omega}}$$

Merger rateのestimate

roughには我々の銀河一個あたりのevent rateは

$$R = \sum_i \frac{V_{gal}}{V_{max}(i) \tau(i)}$$

$V_{max}(i)$ 観測されたNS連星を
仮想的に他の場所に置いた
ときにそれが観測されている
はずと考えられる場所の体積

ESTIMATES FOR GALACTIC IN-SPIRAL RATES AND PREDICTED LIGO DETECTION RATES (AT 95%
CONFIDENCE) FOR DIFFERENT POPULATION MODELS

| MODEL ^a | \mathcal{R}_{tot} (Myr ⁻¹) | IRF | \mathcal{R}_{det} of LIGO ^b | |
|--------------------|--|-----|--|---|
| | | | Initial (kyr ⁻¹) | Advanced (yr ⁻¹) |
| 1 | 23.2 ^{+59.4} _{-18.5} | 6.4 | 9.7 ^{+24.9} _{-7.7} | 52.2 ^{+133.6} _{-41.6} |
| 6 | 83.0 ^{+209.1} _{-66.1} | 6.3 | 34.8 ^{+87.6} _{-27.7} | 186.8 ^{+470.5} _{-148.7} |
| 9 | 7.9 ^{+20.2} _{-6.3} | 6.6 | 3.3 ^{+8.4} _{-2.6} | 17.7 ^{+45.4} _{-14.1} |
| 10 | 23.3 ^{+57.0} _{-18.4} | 5.8 | 9.8 ^{+23.9} _{-7.7} | 52.4 ^{+128.2} _{-41.3} |
| 12 | 9.0 ^{+21.9} _{-3.1} | 6.0 | 3.8 ^{+9.2} _{-2.8} | 20.2 ^{+49.4} _{-12.9} |
| 14 | 0.4 ~ 400yr ⁻¹ for advLIGO/Virgo (Abadie et al. 2010) | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| 15 | 11.6 ^{+30.3} _{-3.3} | 6.9 | 21.6 ^{+56.7} _{-17.4} | 116.1 ^{+304.4} _{-93.4} |
| 17 | 51.6 ^{+135.3} _{-41.5} | 6.9 | 21.6 ^{+56.7} _{-17.4} | 116.1 ^{+304.4} _{-93.4} |
| 19 | 14.6 ^{+38.2} _{-11.7} | 7.0 | 6.1 ^{+16.0} _{-4.9} | 32.8 ^{+86.0} _{-26.3} |
| 20 | 89.0 ^{+217.9} _{-70.8} | 6.2 | 37.3 ^{+91.2} _{-29.6} | 200.3 ^{+490.3} _{-159.3} |

^a Model numbers correspond to KKL. Model 1 was used as a reference model in KKL. Model 6 is our reference model in this study.

^b Increase rate factor compared to previous rates reported in KKL. $IRF \equiv \mathcal{R}_{peak,new} / \mathcal{R}_{peak,KKL}$.